

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**INGENIERA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN  
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN**



**PROYECTO FINAL DE CARRERA**

**Entorno de simulación en la banda ISM para  
test de algoritmos de detección espectral**

**AUTOR: VIRGINIA ANDÚJAR MORGADO  
TUTOR: MANEL MARTÍNEZ-RAMÓN**

**Leganés a 25 de Febrero del 2010.**



# Agradecimientos

*Para empezar me gustaría dar las gracias a mi tutor, Manel Martínez Ramón, por haberme ayudado en todo lo que ha podido y por su paciencia, ya que han habido momentos en los que el proyecto se hacía cuesta arriba y era difícil continuar. También me gustaría dar las gracias a mis padres y a mis hermanos, por el apoyo incondicional desde el principio hasta el final de la carrera.*

*A una persona muy especial para mí, a mi querido Manu, el que ha aguantado todas mis quejas y nunca me ha puesto mala cara por ello y sobre todo por su persistente ayuda.*

*Por último quiero dedicárselo a mi abuelo, que aunque ya no esté conmigo le que sigo queriendo muchísimo.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Motivación y objetivos . . . . .	8
1.2. Resumen de las aportaciones . . . . .	9
1.3. Estructura del documento . . . . .	9
<b>2. Introducción a la banda ISM</b>	<b>12</b>
2.1. Bluetooth . . . . .	17
2.2. WiFi . . . . .	21
2.3. Otros estándares en ISM . . . . .	24
2.3.1. ZigBee . . . . .	24
2.3.2. HomeRF y HomeRF2 . . . . .	25
2.4. Interferencias entre Bluetooth y WiFi . . . . .	27
<b>3. Estudio de las distintas tecnologías</b>	<b>30</b>
3.1. Bluetooth - IEEE 802.15.1 . . . . .	30
3.2. Wifi - IEEE 802.11g . . . . .	38
3.2.1. OFDM . . . . .	42
3.2.2. CCK(modulación por código complementario) . . . . .	46

<b>4. Entorno de la simulación ISM</b>	<b>50</b>
4.1. Introducción . . . . .	50
4.2. Modelado de las distintas tecnologías inalámbricas . . . . .	53
4.2.1. Bluetooth - IEEE 802.15.1 . . . . .	53
4.2.2. Wifi - IEEE.802g . . . . .	62
4.3. Representación conjunta de las tres señales generadas en Simulink	73
4.4. Resumen . . . . .	74
<b>5. Estimación espectral paramétrica de señales en el canal ISM</b>	<b>76</b>
5.1. Introducción . . . . .	76
5.2. Generación de las funciones de autocorrelación . . . . .	77
5.2.1. Bluetooth . . . . .	77
5.2.2. OFDM . . . . .	79
5.2.3. CCK . . . . .	82
5.3. Modelo de autocorrelación de la señal en el canal ISM . . . . .	85
5.3.1. Estimación de las parámetros mediante el método de mínimos cuadrados . . . . .	85
5.4. Resumen . . . . .	90
<b>6. Experimentos</b>	<b>91</b>
6.1. Introducción . . . . .	91
6.2. Experimento en canal gaussiano . . . . .	91
6.2.1. Señales con amplitudes iguales . . . . .	92
6.2.2. Señales con amplitudes distintas . . . . .	95
6.3. Canal con desvanecimiento plano . . . . .	97
6.3.1. Señales con amplitudes iguales . . . . .	97
6.3.2. Señales con amplitudes distintas . . . . .	99
6.4. Canal dispersivo . . . . .	102

6.4.1. Señales con amplitudes iguales . . . . .	102
6.4.2. Señales con amplitudes iguales . . . . .	104
<b>7. Conclusiones</b>	<b>107</b>
7.1. Resumen . . . . .	107
7.2. Resultados . . . . .	108
7.3. Trabajos futuros . . . . .	109

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y objetivos

Uno de los campos de investigación más activos actualmente es el de las redes inalámbricas. De origen militar, durante más de 30 años se ha trabajado en este tipo de redes, pero ha sido en los últimos años cuando el auge de la tecnología inalámbrica y su bajo coste han provocado el mayor avance en el desarrollo de la investigación en este campo.

Estamos en un mundo en el cual la movilidad es una necesidad en constante aumento y en el que el acceso a la información no puede tener límites. En áreas de satisfacer estas necesidades, han surgido nuevas tecnologías, cada una enfocada en un campo de acción específico. Teléfonos móviles (acceso a WAN), WLAN IEEE 802.11 (acceso a LAN) y Bluetooth (acceso a PAN), son ejemplos de tecnologías inalámbricas, cada una con un campo de acción diferente, pero que en conjunto conforman una completa solución a los problemas de movilidad.

En este proyecto se realiza la simulación de cada una de las tecnologías ele-



gidas, Wifi y Bluetooth y representando los esquemas espectrales para poder determinar cuantos son los usuarios y qué tipo de modulación está usando cada uno en el canal elegido, en lo que se ha dado en menos técnicas de detección espectral [2], para su uso en radio cognitivo [4]

## 1.2. Resumen de las aportaciones

1. Búsqueda de información de las capas físicas de ambas tecnologías.
2. Simulación del canal ISM, Bluetooth y Wifi, mediante la herramienta Simulink.
3. Aplicación de un algoritmo de estimación de usuarios y tecnologías (Bluetooth, Wifi usando la modulación OFDM o CCK) que están presentes en la transmisión, con objeto de determinar los huecos en el canal. Se divide en dos pasos:
  - a) Síntesis de las autocorrelaciones de cada una de las posibles señales.
  - b) Usando un modelo de autocorrelación, se determina una estimación temporal basada en la señal simulada con Simulink, generada a partir de las autocorrelaciones sintetizadas en el apartado anterior. La estimación espectral se construye haciendo una transformada de Fourier de la autocorrelación estimada

## 1.3. Estructura del documento

- Introducción a la banda ISM.

Se va hacer una introducción de la banda ISM hablando sobre sus carac-

terísticas y tipos de coberturas, a parte de introducir cada una de las tecnologías que se van a simular en este proyecto a parte de anunciar alguna más.

■ Estudio de las distintas tecnologías.

Se va a plasmar toda la información obtenida durante el proceso del estudio de las tecnologías, haciendo incapie en los siguientes puntos:

- Protocolos.
- Capa física.
- Capa de enlace.
- Acceso al canal.
- Tasas y velocidades.

■ Entorno de la simulación ISM.

Se explicará en que consiste las herramientas usadas para la realización de las simulaciones, a parte de explicar detalladamente los módulos que forman cada uno de los bloques que corresponden a cada tecnología.

■ Estimación espectral paramétrica de señales en el canal ISM.

Es la última parte de los experimentos, en donde se explica como se han ido desarrollando los procesos para el cálculo de las estimaciones espectrales de cada una de las tecnologías, mostrando los resultados obtenidos.

■ Experimentos.

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos, es decir, las amplitudes y canales óptimos, teniendo en cuenta distintos tipos de canales, es decir, sin desvanecimiento (no fading), desvanecimiento plano (flat fading) y desvanecimiento dispersivo (dispersive fading).

- Conclusiones.

## Capítulo 2

# Introducción a la banda ISM

Las redes inalámbricas son aquellas que se comunican por un medio de transmisión no guiado (sin cables) mediante ondas electromagnéticas [6]. La transmisión y la recepción se realizan a través de antenas. Tienen ventajas como la rápida instalación de la red sin la necesidad de usar cableado, permiten la movilidad y tienen menos costos de mantenimiento que una red convencional.

Otra de las ventajas de redes inalámbricas es la movilidad. Red inalámbrica los usuarios puedan conectarse a las redes existentes y se permite que circulen libremente. Un usuario de telefonía móvil puede conducir millas en el curso de una única conversación, porque el teléfono se conecta al usuario a través de torres de la célula. Inicialmente, la telefonía móvil es cara. Costes de su uso restringido a profesionales de gran movilidad, como directores de ventas y ejecutivos encargados de adoptar decisiones importantes que tendrían que ser alcanzados en un momento de aviso, independientemente de su ubicación. La telefonía móvil ha demostrado ser un servicio útil.

Otras ventajas de las redes inalámbricas a nivel laboral:

- Accesibilidad: Todos los equipos portátiles y la mayoría de los teléfonos

móviles de hoy día vienen equipados con la tecnología Wi-Fi necesaria para conectarse directamente a una LAN inalámbrica. Los usuarios puede acceder de forma segura a sus recursos de red desde cualquier ubicación dentro de su área de cobertura. Generalmente, el área de cobertura es su instalación, aunque se puede ampliar para incluir más de un edificio.

- **Movilidad:** Los empleados pueden permanecer conectados a la red incluso cuando no se encuentren en sus mesas. Los asistentes de una reunión pueden acceder a documentos y aplicaciones. Los vendedores pueden consultar la red para obtener información importante desde cualquier ubicación.
- **Productividad:** El acceso a la información y a las aplicaciones clave de su empresa ayuda a su personal a realizar su trabajo y fomentar la colaboración. Los visitantes (como clientes, contratistas o proveedores) pueden tener acceso de invitado seguro a Internet y a sus datos de empresa.
- **Fácil configuración:** Al no tener que colocar cables físicos en una ubicación, la instalación puede ser más rápida y rentable. Las redes LAN inalámbricas también facilitan la conectividad de red en ubicaciones de difícil acceso, como en un almacén o en una fábrica.
- **Escalabilidad:** Conforme crecen sus operaciones comerciales, puede que necesite ampliar su red rápidamente. Generalmente, las redes inalámbricas se pueden ampliar con el equipo existente, mientras que una red cableada puede necesitar cableado adicional.
- **Seguridad:** Controlar y gestionar el acceso a su red inalámbrica es importante para su éxito. Los avances en tecnología Wi-Fi proporcionan protecciones de seguridad sólidas para que sus datos sólo estén disponibles para las personas a las que le permita el acceso.

- Costes: Con una red inalámbrica puede reducir los costes, ya que se eliminan o se reducen los costes de cableado durante los traslados de oficina, nuevas configuraciones o expansiones.

Del mismo modo, las redes inalámbricas te liberan de la ataduras de un cable Ethernet en un escritorio. Los usuarios o desarrolladores pueden trabajar en la biblioteca, en una sala de conferencias, en el estacionamiento, o incluso en la cafetería de enfrente. Mientras los usuarios de la red inalámbrica estén dentro de los márgenes, pueden tomar ventaja de la red. Equipos disponibles puede abarcar un campus corporativo, y en terreno favorable, puede ampliar el alcance de una red 802.11 hasta unos pocos kilómetros.

Según su cobertura, se pueden clasificar en diferentes tipos (figura 2.1) :

### 1. Wireless Personal Area Network

En este tipo de red de cobertura personal, existen tecnologías basadas en HomeRF (estándar para conectar todos los teléfonos móviles de la casa y los ordenadores mediante un aparato central); Bluetooth (protocolo que sigue la especificación IEEE 802.15.1); ZigBee (basado en la especificación IEEE 802.15.4 y utilizado en aplicaciones como la domótica, que requieren comunicaciones seguras con tasas bajas de transmisión de datos y maximización de la vida útil de sus baterías, bajo consumo); RFID (sistema remoto de almacenamiento y recuperación de datos con el propósito de transmitir la identidad de un objeto (similar a un número de serie único) mediante ondas de radio.

### 2. Wireless Local Area Network

En las redes de área local podemos encontrar tecnologías inalámbricas basa-

das en HiperLAN (del inglés, High Performance Radio LAN), un estándar del grupo ETSI, o tecnologías basadas en Wi-Fi, que siguen el estándar IEEE 802.11 con diferentes variantes.

### 3. Wireless Metropolitan Area Network

Para redes de área metropolitana se encuentran tecnologías basadas en WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, es decir, Interoperabilidad Mundial para Acceso con Microondas), un estándar de comunicación inalámbrica basado en la norma IEEE 802.16. WiMAX es un protocolo parecido a Wi-Fi, pero con más cobertura y ancho de banda. También podemos encontrar otros sistemas de comunicación como LMDS (Local Multipoint Distribution Service).

### 4. Wireless Wide Area Network

En estas redes encontramos tecnologías como UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), utilizada con los teléfonos móviles de tercera generación (3G) y sucesora de la tecnología GSM (para móviles 2G), o también la tecnología digital para móviles GPRS (General Packet Radio Service).

Así mismo se pueden conectar diferentes localidades utilizando conexiones satelitales o por antenas de radio microondas. Estas redes son mucho más flexibles, económicas y fáciles de instalar.

En sí la forma más común de implantación de una red WAN es por medio de Satélites, los cuales enlazan una o más estaciones bases, para la emisión y recepción, conocidas como estaciones terrestres. Los satélites utilizan una banda de frecuencias para recibir la información, luego amplifican y repiten la señal para enviarla en otra frecuencia.

Para que la comunicación satelital sea efectiva generalmente se necesita que

los satélites permanezcan estacionarios con respecto a su posición sobre la tierra, si no es así, las estaciones en tierra los perderían de vista. Para mantenerse estacionario, el satélite debe tener un periodo de rotación igual que el de la tierra, y esto sucede cuando el satélite se encuentra a una altura de 35,784 Km.

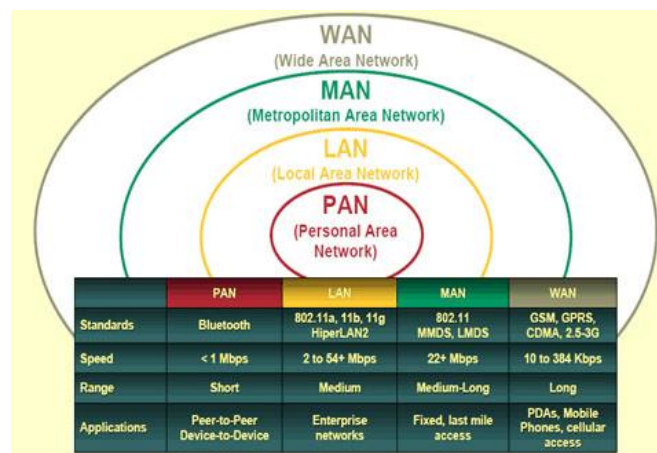


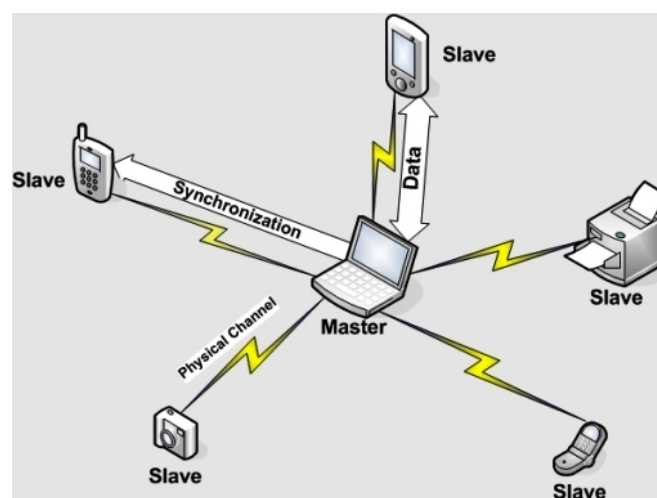
Figura 2.1: Clasificación de las redes inalámbricas.



## 2.1. Bluetooth

En 1994 Ericsson inició un estudio para investigar la viabilidad de una interfase vía radio, de bajo coste y bajo consumo, para la interconexión entre teléfonos móviles y otros accesorios con la intención de eliminar cables entre aparatos [7]. El estudio partía de un largo proyecto que investigaba sobre unos multi-comunicadores conectados a una red celular, hasta que se llegó a un enlace de radio de corto alcance, llamado MC link. Conforme éste proyecto avanzaba se fue viendo claro que éste tipo de enlace podía ser utilizado ampliamente en un gran número de aplicaciones, ya que tenía como principal virtud el que se basaba en un chip de radio relativamente económico.

En Febrero de 1998, se formó el grupo especial interesado (SIG, Special Interest Group), conformado por cinco promotores de esta tecnología: Ericsson, Nokia, IBM, Toshiba e Intel. La idea era lograr un conjunto adecuado de áreas de negocio; dos líderes del mercado de las telecomunicaciones, dos líderes del mercado de computadoras portátiles y un líder de la fabricación de chips.



El propósito de esta elección fue el de incidir fuertemente en el mercado de las comunicaciones inalámbricas, estableciendo un estándar de comunicación por radio que llamaran Bluetooth, permitiendo asegurar la interoperabilidad entre equipos de diversos fabricantes.

Además este sistema, dado que se orientó a gente de negocios que viaja frecuentemente, se deseaba que cumpliera con los siguientes objetivos:

- Debería operaren todo el mundo.
- Debe integrarse en equipos alimentados por baterías, por lo que debería consumir poca energía.
- Su conexión deberá soportar aplicaciones multimedia (voz y datos).

Para lograr cumplir con los objetivos en especial el de operabilidad global, se tomó como banda de frecuencia de trabajo la banda ISM (Industrial-Scientific-Medical) de 2.4GHz, banda de uso libre, con algunas restricciones en Francia, España y Japón. Pero debido a que esta banda esté abierta a cualquiera, los dispositivos Bluetooth están expuestos a muchas fuentes de interferencia. Éstas pueden ser evitadas utilizando un sistema que busque una parte no utilizada del espectro o un sistema de salto de frecuencia. En los sistemas de radio Bluetooth se suele utilizar el método de salto de frecuencia debido a que ésta tecnología puede ser integrada en equipos de baja potencia y bajo coste. Éste sistema divide la banda de frecuencia en varios canales de salto, donde los transmisores, durante la conexión van cambiando de uno a otro canal de salto de manera pseudo-aleatoria. Con esto se consigue que el ancho de banda instantáneo sea muy pequeño y también una propagación efectiva sobre el total de ancho de banda. En conclusión, con el sistema FH (Frequency Hopping), se pueden conseguir transmisores de

banda estrecha con una gran inmunidad a las interferencias.

Actualmente en España, como en la mayoría de países, la telefonía celular ha ido introduciendo al consumidor a poseer dispositivos portátiles, así es que en la competencia, no solo es objetivo ofrecer excelentes servicios de comunicación de telefonía móvil, sino también ofrecer equipos con numerosas aplicaciones en que el intercambio de información inalámbrica se ha hecho atractivo y de pronto una necesidad para las personas de negocios, y ha sido Bluetooth una de las posibilidades para satisfacer esta necesidad de conectividad. Así también las computadoras portátiles y PDA's (Personal Digital Assistant) han pasado a ser herramientas importantes para estas personas de negocio, donde mantenerse comunicado agiliza su productividad. Pero no solo los negocios ha acaparado esta tecnología, en el campo del entretenimiento podemos encontrar auriculares, joystick, juguetes que disponen de la tecnología Bluetooth; así también en el campo investigativo buscando entender su funcionamiento, complementando el aprendizaje sobre redes de área personal a ingenieros en el campo de las telecomunicaciones, optimizando su implementación o aportando para mejorar esta tecnología.

Podemos distinguir dos categorías de Bluetooth bastante populares: la clase 1 y la clase 2, refiriéndose a la potencia de transmisión. El estándar mas común y barato es la clase 2, que te permite tener un dispositivo a unos 10 metros de distancia. La clase 1 es menos común, pero no es difícil encontrar algunos dispositivos que lo usan. Su alcance es mayor, alrededor de unos 100 metros.

- **Problemas y desventajas de la tecnología bluetooth:**

Como todo, la tecnología Bluetooth, también presenta algunos problemas que solucionar. Los microchips no son baratos aún, se espera que dentro de unos años disminuyan los costos, de lo contrario, el objetivo de esta tecnología no sería alcanzado. Por su parte, la velocidad de transmisión, aunque considerable, pronto quedará empujada por la capacidad de los móviles de tercera generación. Y a pesar de que los prototipos de dispositivos Bluetooth se reproducen rápidamente, no sucede lo mismo con los programas informáticos que deben regular su funcionamiento.

Además, el espectro de radiofrecuencia en el que opera no está abierto al público en todos los países. En lugares como Francia o España el uso del espectro está restringido y se requiere la aprobación explícita del gobierno para poder operar en la banda ISM.

La interoperabilidad, pilar sobre el que se sustenta Bluetooth, es uno de los factores que se someterán a tensiones en el largo plazo. Con miles de compañías diseñando productos y aplicaciones Bluetooth, será difícil mantenerlas a todas bajo el mismo manto. Aun así, las desventajas son mínimas cuando se comparan con los beneficios de disfrutar de un mundo sin cables y con las flexibilidades que ofrecería un mundo interconectado de manera inalámbrica y sin altos costos de conexión.

## 2.2. WiFi

Wi-Fi significa Wireless Fidelity, y es un conjunto de especificaciones de comunicación inalámbrica basados en el estándar 802.11 [10].

A veces se le define simplemente como Wireless, que significa sin cable, en contraposición a Wired, que se traduciría como cableado o cableada, en referencia a una red.

Aunque hace bastante tiempo que existen las comunicaciones de red inalámbricas, existía un grave problema de incompatibilidades, ya que prácticamente cada fabricante usaba un estándar diferente.

Por este motivo, en 1.999 varias empresas (las principales del sector de comunicaciones y redes, como 3com, Airones, Intersil, Lucent Technologies, Nokia y Symbol Technologies) crean la WECA (Wireless Ethernet Compability Aliance).

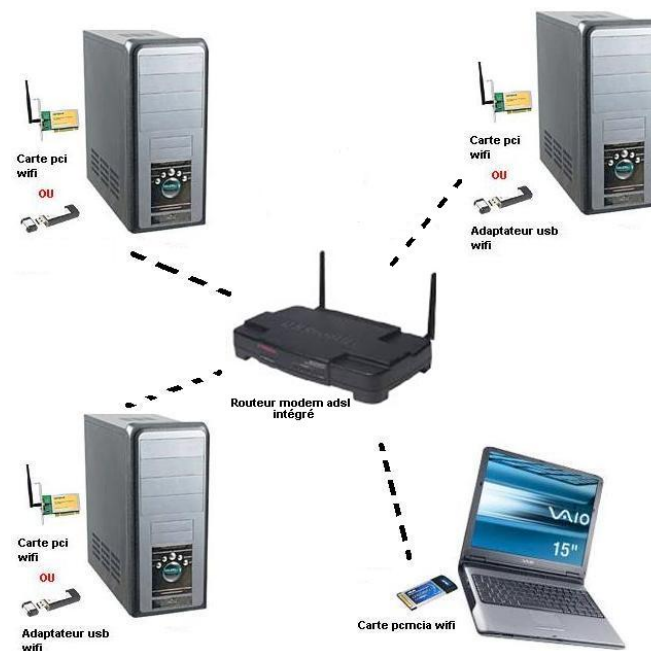


Figura 2.2: WiFi

La WECA se encarga de certificar las diferentes especificaciones, así como su compatibilidad [9]. En el año 2.000 certifica la interoperatividad (es decir, que puedan operar entre ellos) de equipos bajo la especificación IEEE 802.11b, a la que denomina Wi-Fi. Esta denominación por extensión se utiliza para todas las especificaciones posteriores basadas en el estándar 802.11x de comunicaciones inalámbricas.

Principales especificaciones existentes:

- **IEEE 802.11.-** Funciona en la banda de 2.4GHz, con una velocidad máxima de entre 1Mbps y 2Mbps. Totalmente en desuso.
- **IEEE 802.11a.-** Funciona en la banda de 5GHz, con una velocidad máxima de 54Mbps. No llegó a utilizarse en la práctica, ya que es incompatible con las demás especificaciones, que trabajan a 2.4GHz.
- **IEEE 802.11b.-** Funciona en la banda de 2.4GHz, con una velocidad máxima de 11Mbps. La velocidad real mantenida está en torno a los 6Mbps.
- **IEEE 802.11g.-** Funciona en la banda de 2.4GHz, con una velocidad máxima de 54Mbps. La velocidad real mantenida está en torno a los 25Mbps. Esta especificación es compatible con la IEEE 802.11b, pero evidentemente en transmisiones entre dos puntos se adaptará siempre al de menor velocidad, disminuyendo sensiblemente la velocidad cuando existe un nodo que utiliza la especificación IEEE 802.11b.
- **IEEE 802.11n.-** Es la especificación más reciente. Esta especificación funciona tanto en la banda de 2.4GHz como en la de 5GHz, y una velocidad máxima de 600Mbps, La velocidad real mantenida está en por encima de

los 100Mbps.

Este incremento en la velocidad, y también en el alcance, se consigue gracias a la utilización de una serie de tecnologías, entre ellas MIMO (Multiple Input - Multiple Output), que permite la comunicación a través de varios canales a la vez utilizando tres antenas, pudiendo ser una de ellas omnidireccional.

Está en desarrollo un denominado 802.11i que más que nada implementaría la utilización de encriptaciones WPA2.

Todos ellos son totalmente compatibles con la especificación IEEE 802.3, que es la utilizada por las redes Wired o cableadas, lo que hace que funcionen sin ningún problema redes mixtas, es decir, redes en las que tenemos elementos conectados mediante Wi-Fi y otro mediante cableado UTP.

La Legislación de Wireless en España para el nivel de señal en transmisión es de 100mW para la frecuencia de 2.4GHz y de 1W para la frecuencia de 5.4GHz, esto quiere decir que si empleamos amplificadores que superen estas cantidades estaremos incumpliendo esta normativa, pero como podéis ver todas las especificaciones reseñadas se encuentran dentro de estos límites, por lo que no tienen ningún problema de legalidad.

Los problemas principales de esta tecnología:

Aparte del tema de la seguridad, el principal problema de las redes Wi-Fi se debe a la utilización de la banda de 2.4GHz. Esta misma banda es la utilizada por elementos tales como teléfonos inalámbricos, Bluetooth, microondas y otros, por lo que cualquiera de estos elementos puede causar (y de hecho causa) interferencias en la señal, disminuyendo su alcance, calidad y fiabilidad.

En buena parte esto se está solucionando en la especificación IEEE 802.11n, ya que esta puede utilizar la banda de 5GHz, en la que ya no tendría este problema, ya que se trata de una banda prácticamente libre.

## 2.3. Otros estándares en ISM

Otras de las tecnologías que se encuentran en la banda ISM, que han sido ya comentadas, pueden ser las tecnologías ZigBee y UWB.

### 2.3.1. ZigBee

ZigBee [8] es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

ZigBee es muy similar al Bluetooth, pero con algunas diferencias:

- Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred (Piconet) Bluetooth.
- Menor consumo eléctrico que el de Bluetooth. En términos exactos, ZigBee tiene un consumo de 30mA transmitiendo y de 3uA en reposo, frente a los 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo que tiene el Bluetooth. Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no



se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.

- Tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que en Bluetooth es de hasta 1 Mbps.
- Debido a las velocidades de cada uno, uno es más apropiado que el otro para ciertas cosas. Por ejemplo, mientras que el Bluetooth se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del ZigBee se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la Domótica, los productos dependientes de la batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.

### 2.3.2. HomeRF y HomeRF2

La idea de este estándar se basa en el Teléfono inalámbrico digital mejorado (Digital Enhanced Cordless Telephone, DECT) que es un equivalente al estándar de los teléfonos celulares GSM [5]. Transporta voz y datos por separado, al contrario que protocolos como el WiFi que transporta la voz como una forma de datos. Los creadores de este estándar pretendían diseñar un aparato central en cada casa que conectara los teléfonos y además proporcionar un ancho de banda de datos entre las computadoras.

Las prestaciones de este sistema son:

- Modulación FSK (Frequency Shift Keying).
- Velocidad de datos variables de entre 800 Kbps y 1.6Mbps.
- Utiliza la banda de 2.4 Ghz.
- 75 canales de 1 Mhz para voz.

Las prestaciones exclusivas para el HomeRF2 son:

- Velocidad de entre 5 y 10 Mbps.
- 15 canales de 5 MHz para voz.

Cabe resaltar que el estándar HomeRF posee multitud de capacidades de voz (identificador de llamadas, llamadas en espera, regreso de llamadas e intercomunicación dentro del hogar).

## 2.4. Interferencias entre Bluetooth y WiFi

Las tecnologías Bluetooth y WiFi [6] no compiten entre sí, sino que se complementan. Bluetooth es mucho más nueva. Es el equivalente inalámbrico de la conectividad USB. Debido a su corto alcance y al bajo consumo de energía se le usa para conectar toda clase de dispositivos a la computadora. También para teléfonos celulares y palmtops. La cobertura máxima que alcanza es de 20 metros. La tecnología WiFi por su parte resulta ideal para armar redes de computadoras. Con esta se pueden mover archivos de gran tamaño. La transmisión de los datos la realiza diez veces más rápido que Bluetooth y tiene un alcance de 100 metros en espacios cerrados. Dicha tecnología permite realizar diversas conexiones inalámbricas a Internet.

Los sistemas de comunicación wireless usan una o mas frecuencias portadoras (bandas de frecuencia) para comunicarse. Bluetooth y Wi-Fi comparten la misma banda de 2.4 GHz, la cual bajo las regulaciones de Federal Communications Commission (FCC), se extiende de 2.4 hasta 2.4835 GHz. Bajo las reglas de la banda ISM definidas en FCC Part 15.247, esta banda de frecuencia es libre de tarifas. Sin embargo estos sistemas deben operar bajo ciertas restricciones cuyo propósito es permitir que varios sistemas coexistan en tiempo y espacio.

Un sistema puede usar uno de dos métodos para transmitir en esta banda; ambos son técnicas spread spectrum (SS). La primera es frequency hopping spread spectrum (FHSS) que permite a un dispositivo transmitir mucha energía en una banda relativamente estrecha, pero por un tiempo limitado. Direct sequence spread spectrum (DSSS) le permite a un dispositivo ocupar un ancho de banda mas amplio con relativa poca energía en un segmento de banda dado y no realiza

hops.

Como se dijo anteriormente, Bluetooth selecciono FHSS, usando canales de 1 MHz de ancho y una tasa de hop de 1600 hops/s (625 microsegundos en cada canal de frecuencia). Bluetooth usa 79 canales diferentes en los Estados Unidos y en la mayoría del resto del mundo. IEEE 802.11b (Wi-Fi) opto por DSSS, usando 22 MHz de ancho de banda (pasabanda) para transmitir a velocidades de hasta 11 Mb/s. Un sistema Wi-Fi puede usar cualquiera de los 11 subcanales de 22 MHz de ancho de banda, a través de los aceptables 83.5 MHz de los 2.4 GHz de la banda de frecuencia, que obviamente va a resultar en un solapamiento de los canales. Un máximo de tres redes Wi-Fi pueden coexistir sin interferir la una con la otra, dado que solo tres de esos canales de 22 MHz pueden encajar en la banda sin solapamiento. En lugares fuera de los Estados Unidos pueden soportar más o menos de 11 subcanales. Sin embargo sin importar en la porción de la banda donde Wi-Fi opere, compartir con Bluetooth es inevitable. Dos sistemas inalámbricos compartiendo la misma banda de frecuencia pueden potencialmente interferir el uno con el otro.

### **Bluetooth y Wi-Fi Casos de Interferencia:**

Si Bluetooth y Wi-Fi operan al mismo tiempo en la misma banda de frecuencia, ellos van a interferir (colisionar) el uno con el otro. Específicamente, estos sistemas transmiten en frecuencias solapadas (incluyendo el efecto de las bandas laterales), creado ruido coloreado en la banda de uno y del otro. La interferencia entre Bluetooth y Wi-Fi ocurre cuando cualquiera de los siguiente es verdad:

- Un receptor Wi-Fi siente una señal Bluetooth al mismo tiempo que una señal Wi-Fi esta siendo enviada hacia el. El efecto es mas pronunciado cuando la señal Bluetooth esta dentro los 22 MHz ancho pasabanda del

receptor Wi-Fi.

- Un receptor Bluetooth siente una señal Wi-Fi al mismo tiempo que una señal Bluetooth esta siendo enviada hacia el; el efecto es mas pronunciado cuando una señal Wi-Fi esta dentro de la pasabanda del receptor Bluetooth.

Vale la pena notar que ni Bluetooth ni Wi-Fi fueron diseñados con mecanismos específicos para combatir la interferencia que uno crea en el otro. Como un sistema de rápido salto en frecuencia (fast frequency-hopping), Bluetooth asume que el va saltar lejos de canales malos, minimizando su exposición a la interferencia. La capa MAC de Wi-Fi, la cual esta basada en el protocolo de Ethernet, asume que varias estaciones comparten el mismo medio, y en consecuencia, si una transmisión falla, es porque dos estaciones Wi-Fi intentaron transmitir a la vez.

# Capítulo 3

## Estudio de las distintas tecnologías

Esta parte se basa en buscar toda la información para poder saber como funciona cada una de las tecnologías, tratando de conocer como trabajan en la capa física [6].

### 3.1. Bluetooth - IEEE 802.15.1

Bluetooth es la interfaz de radio universal [1], trabajando en la banda de frecuencia de los 2.45Ghz, que permite que los dispositivos electrónicos se conecten y comuniquen inalámbricamente en un rango de corto alcance, formando redes ad hoc.

Corresponde al estándar WPAN (Redes inalámbricas de área personal), que incluye redes inalámbricas de corto alcance que abarcan un área de algunas decenas de metros. Este tipo de red se usa generalmente para conectar dispositivos periféricos (por ejemplo, impresoras, teléfonos móviles y electrodomésticos) o un asistente personal digital (PDA) a un ordenador sin conexión por cables. También se pueden conectar de forma inalámbrica dos ordenadores cercanos.

Bluetooth fue lanzado por Ericsson en 1994. Ofrece una velocidad máxima de 1

Mbps con un alcance máximo de unos treinta metros. La tecnología Bluetooth, también conocida como IEEE 802.15.1, tiene la ventaja de tener un bajo consumo de energía, algo que resulta ideal para usarla en periféricos de pequeño tamaño. Esta tecnología permite a los usuarios conexiones instantáneas de voz y datos entre varios dispositivos en tiempo real. El modo de transmisión empleado, asegura protección contra interferencias y seguridad en el envío de datos.

### ■ Protocolos

La pila de protocolos [7] (Figura 3.1) describe el lenguaje común que deben utilizar los dispositivos para comunicarse entre sí. Los protocolos pueden ser divididos en cuatro capas:

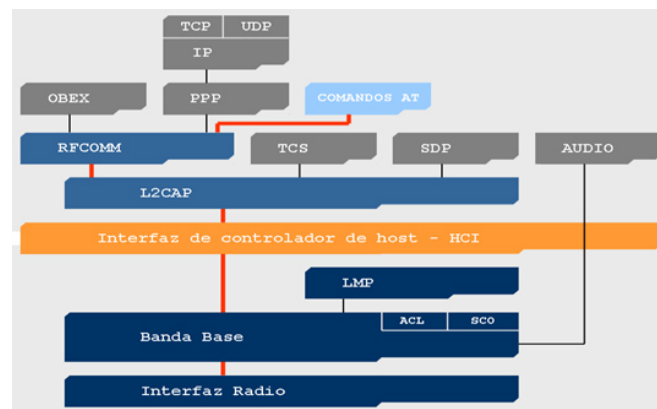


Figura 3.1: Pila protocolos de Bluetooth

1. Protocolos Bluetooth Centrales (Bluetooth Core Protocols: BaseBand, LMP, L2CAP, SDP).
2. Protocolos de Reemplazo de Cable (Cable Replacement Protocols: RFCOMM).
3. Protocolos de control de Telefonía (Telephony Control Protocols: TCS Binary, AT-Commands).

4. Protocolos Adaptados (Adapted Protocols: PPP, UDP/TCP/IP, OBEX, WAP, vCard, vCal, IrMC, WAE).

#### ■ Capa física

Bluetooth es un protocolo de comunicaciones inalámbrico de corto alcance y bajo consumo. Opera en la banda de 2.4 GHz libre para ISM (banda de frecuencia industrial, científica y médica). Los rangos del ancho de banda en Europa están en 2400.0 - 2483.5 MHz. El sistema emplea un transmisor de salto de frecuencia para contrarrestar las interferencias y la pérdida de intensidad, y cuenta con gran número de portadoras de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS). Para minimizar la complejidad del transmisor, se utiliza una modulación de frecuencia binaria. La tasa de transferencia de símbolos es de 1 megasímbolos/segundo, que admite una velocidad de transmisión de 1 Megabit por segundo (Mbps) en el modo de transferencia básica y una velocidad de transmisión aérea total de 2 a 3 Mbps en el modo de transferencia de datos mejorada. Estos modos se conocen como transferencia básica y transferencia de datos mejorada, respectivamente. Los canales están espaciados 1MHz y organizados por el número de canales K de acuerdo a la siguiente fórmula 3.1,

$$f = 2402 + KMHz, K = 0, \dots, 78 \quad (3.1)$$

Por lo tanto la capa física de Bluetooth tiene un ancho de banda de 79 Mhz usando FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). El ancho de banda a 3dB usado en cada salto es de 1Mhz.

Para compartir el canal de transmisión Bluetooth se usa un esquema de división de tiempo dúplex(TDD), donde el transmisor y el receptor usan



el canal alternadamente durante intervalos de longitud fija para transmitir sus paquetes.

La modulación usada en Bluetooth es GFSK, "Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gausiana" (Gaussian Frequency Shift Keying), en donde un '1' binario representa una desviación de frecuencia positiva (incremento) y un '0' binario representa una desviación de frecuencia negativa (decremento). Los datos transmitidos tienen una tasa de símbolo de 1Megasímbolo/seg. GFSK es una versión mejorada de la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK). En GFSK la información es pasada por un filtro gaussiano antes de modular la señal. Esto se traduce en un espectro de energía más estrecho de la señal modulada, lo cual permite mayores velocidades de transferencia sobre un mismo canal.

#### ■ Capa de enlace

La red básica es llamada Piconet (Figura 3.2). Está formada por varios dispositivos que se encuentran en el mismo radio de cobertura, en donde comparten un mismo canal y que está construido de dos y ocho de estas unidades [1]. Cada dispositivo tiene una dirección de 48 bits. La llamada Scatternet está formada por la conexión de una Piconet a otra, con un máximo de interconexiones de diez Piconets.

Los canales tienen un ancho de banda de un 1MHz, pero cuantos más usuarios se incorporen a la Piconet, menor serán los recursos adjudicados a cada usuario.

Para ampliar el tamaño de una red de dispositivos Bluetooth es necesario unir una Piconet con otro tipo de redes (WiFi, Ethernet ...) o con otras Piconets, formando lo que se conoce como redes "scatternets":

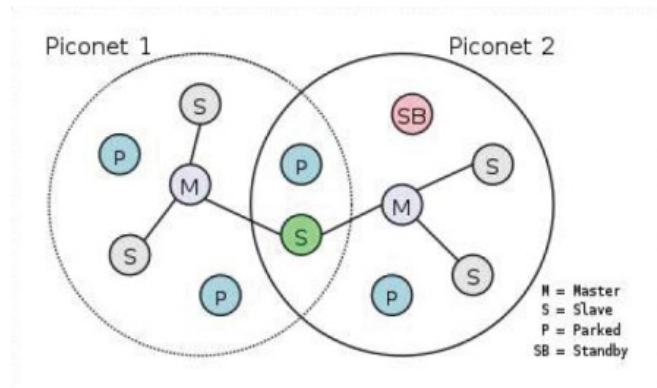


Figura 3.2: Esquema de un piconet

La Scatternet fue introducida para solucionar el problema del bajo ancho de banda que le queda a cada usuario de una Piconet si en esta se encuentran gran cantidad de unidades conectadas.

Una piconet puede constar de dos a ocho dispositivos. En una piconet, habrá siempre un «maestro» y los demás serán esclavos.

El periférico como maestro:

- Se encarga de escoger el salto/frecuencia adecuado para mantener el enlace.
- Bluetooth utiliza el esquema salto de frecuencia/división de tiempo duplex (FH/TDD). El canal es dividido en intervalos de 625microsegundos, llamados slots, donde diferentes saltos de frecuencia son usados para cada slot. Esto da una tasa de saltos de 1600 saltos por segundo. Los slots son usados alternadamente para transmisión y recepción resultando un esquema TDD(Time Division Duplex).

Dos o más unidades Bluetooth pueden compartir el mismo canal dentro de una piconet, donde una unidad actúa como maestra, controlando el tráfico de datos en la piconet que se genera entre las demás unidades, donde estas actúan como esclavas, enviando y recibiendo señales

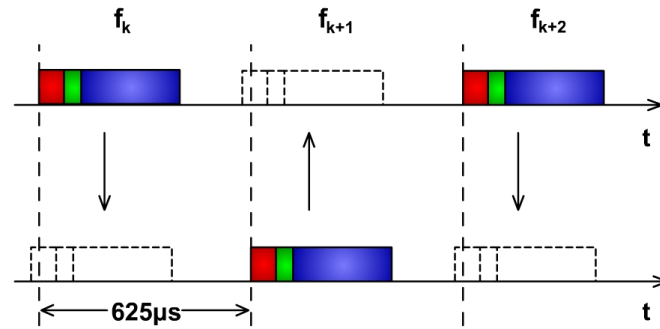


Figura 3.3: Salto de frecuencia/división de tiempo duplex.

hacia el maestro. El salto de frecuencia del canal está determinado por la secuencia de salto, es decir, el orden en que llegan los saltos, y por la fase de ésta secuencia (Figura 3.4). En Bluetooth, la secuencia está determinada para identificar el maestro de la piconet y la fase está determinada para la unidad de reloj del sistema maestro.

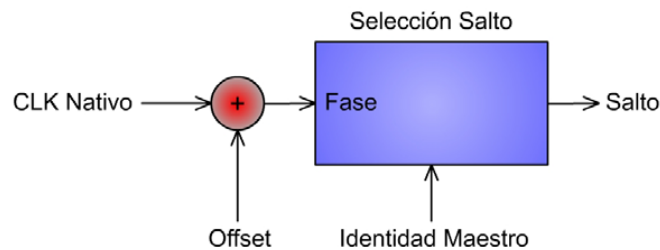


Figura 3.4: Esquema de selección de salto.

- La secuencia única de salto de frecuencia del canal está determinado por la identidad del maestro de la piconet (un código único para cada equipo), y por su frecuencia de reloj. Para que una unidad esclava pueda sincronizarse con una unidad maestra, ésta debe añadir un ajuste a su propio reloj nativo y así poder compartir la misma portadora de salto.

Para formar las "scatternets", un dispositivo Bluetooth es maestro/esclavo

en una piconet y esclavo en otra, haciendo de pasarela entre ambas. Un dispositivo no puede ser maestro en más de una Piconet. Los dispositivos dentro de una Piconet están sincronizados por lo que no interfieren entre ellos, pero al aparecer dispositivos con una sincronización diferente de otra Piconet, pueden comenzar a existir interferencias. Después de la transmisión de cada paquete, se cambia la frecuencia de trabajo. Si ha existido interferencia, el paquete se retransmitirá en la siguiente frecuencia donde la probabilidad de que de nuevo haya interferencia, es baja.

Otra de las características de las configuraciones de red que presentan los dispositivos Bluetooth, es la del control del canal mediante un maestro y los demás dispositivos esclavos. El maestro es la unidad que establece el enlace, o la Piconet. Todas las demás unidades serán los esclavos.

#### ■ Acceso al canal

El canal está dividido en slots, cada uno de 625 microseg. Los tiempos de los slots están numerados de acuerdo al reloj Bluetooth del piconet maestro. EL reloj Bluetooth del maestro determina la fase de la secuencia de saltos.

#### ■ Tasas y velocidades

Se tiene una frecuencia de salto de 1600 saltos/seg y esto corresponde a que la duración de cada slot es de  $1/1600 = 625$  microseg. Cada paquete es transmitido en una frecuencia diferente en la secuencia de salto.

Para emular la transmisión full-duplex se usa el esquema TDD (Time-Division Duplexing). El maestro siempre empieza la transmisión en los slots pares y los esclavos en los slots impares. Para mayor eficiencia se usa una combinación de conmutación de circuitos y paquetes. Se definen dos tipos

de enlaces en un piconet: SCO (Orientada a Conexión Síncrono), y ACL (No Orientada a Conexión Asíncrono).

SCO está orientado a tráfico que no se divide en paquetes y que se ha de entregar en tiempo real. Si hay pérdidas de datos, no se intentará introducir mecanismos de control de error para retransmitir. Este tipo de conexiones es el que se utiliza para el audio y no pasa por la capa L2CAP. El objetivo es mantener una latencia constante en el flujo de datos. En SCO se establece un canal bidireccional entre el maestro y el esclavo punto a punto y el maestro reserva unos slots de tiempo constantes para poder transmitir un flujo de datos de forma permanente. El ancho de banda que se reserva es de 64 kbps por conexión SCO, y se pueden tener hasta tres conexiones de este tipo entre el maestro y el esclavo. Por lo tanto a todos los efectos este tipo de comunicaciones es de conmutación de circuitos, frente a la conmutación de paquetes de las conexiones ACL.

### 3.2. Wifi - IEEE 802.11g

Nokia y Symbol Technologies crearon en 1999 una asociación conocida como WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance, Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica). Esta asociación pasó a denominarse Wi-Fi Alliance en 2003 . El objetivo de la misma fue crear una marca que permitiese fomentar más fácilmente la tecnología inalámbrica y asegurar la compatibilidad de equipos.

De esta forma en abril de 2000 WECA certifica la interoperabilidad de equipos según la norma IEEE 802.11b bajo la marca Wi-Fi . El término no tiene un significado en sí. Esto quiere decir que el usuario tiene la garantía de que todos los equipos que tengan el sello Wi-Fi pueden trabajar juntos sin problemas, independientemente del fabricante de cada uno de ellos. Se puede obtener un listado completo de equipos que tienen la certificación Wi-Fi en Alliance – Certified Products.

La norma IEEE 802.11 [10] fue diseñada para sustituir el equivalente a las capas físicas y MAC de la norma 802.3 (Ethernet). Esto quiere decir que en lo único que se diferencia una red Wi-Fi de una red Ethernet es en cómo se transmiten las tramas o paquetes de datos; el resto es idéntico. Por tanto, una red local inalámbrica 802.11 es completamente compatible con todos los servicios de las redes locales (LAN) de cable 802.3 (Ethernet).

#### ■ Protocolos

El protocolo de datos para todas las capas físicas consisten en un preámbulo y una cabecera seguido por los datos MAC. El receptor usa el preámbulo para detección y sincronización. La cabecera tiene información sobre los datos MAC, como velocidad de transmisión de datos y longitud. Si la capa

física soporta múltiples tasas de datos, el preámbulo y la cabecera son enviadas a la tasa de datos más baja. El preámbulo permite que el receptor se pueda adquirir la señal y sincronizar por sí misma productos inalámbricos con el transmisor. Y la cabecera es la parte restante y contiene información adicional que identifica el esquema de modulación, velocidad de transmisión y la duración del tiempo a transmitir toda la trama.

### ■ Capa física

IEEE 802.11 tiene seis capas físicas. Tres de estas capas físicas están definidas inicialmente y las otras tres se desarrollan más tarde. Las tres capas físicas están relacionadas con la propagación de espectro, el salto de frecuencia y la propagación de espectro de infrarrojos. Estas proporcionan una tasa de datos de 1 y 2 Mbps. En la banda de 2.4 GHz, el número total de canales con un ancho de 1MHz es de 79 canales, desde 2402 MHz a 2480 MHz.

<b>Capa de enlace de datos (MAC)</b>	802.2		
	802.11		
<b>Capa física (PHY)</b>	DSSS	FHSS	Infrarrojo

Figura 3.5: Capa física

### ■ Acceso al canal

El control de acceso [11] al medio usado es por CSMA/CA, que garantiza igual duración de acceso al canal a todos los dispositivos, sin tener en cuen-

ta sus necesidades, es decir, cuando un dispositivo inalámbrico se conecta a una WLAN a una velocidad de bits inferior a la que otros dispositivos por estar demasiado lejos del punto de acceso, el rendimiento de los demás dispositivos de la red se degrada.

IEEE 802.11g opera en la banda ISM 2.4GHz, igual que Bluetooth. Soporta tres tipos de preámbulos y formatos de cabecera diferentes: el preámbulo largo, legado del original IEEE 802.11; el preámbulo corto legado de IEEE 802.11b; el tercer preámbulo y formato de cabecera es legado de IEEE 802.11a.

El estándar 802.11g utiliza la banda de 2.4 – 2.5 Ghz. En esta banda, se definieron 11 canales (tabla 3.1) utilizables por equipos WIFI, que pueden configurarse de acuerdo a necesidades particulares. Sin embargo, los 11 canales no son completamente independientes (canales contiguos se superponen y se producen interferencias). El ancho de banda de la señal (22MHz) es superior a la separación entre canales consecutivos (5MHz), por eso se hace necesaria una separación de al menos 5 canales con el fin de evitar interferencias entre celdas adyacentes. Tradicionalmente se utilizan los canales 1, 6 y 11, aunque se ha documentado que el uso de los canales 1, 5, 9 y 13 (en dominios europeos) no es perjudicial para el rendimiento de la red.

Esta asignación de canales usualmente se hace sólo en el Access Point, pues los “clientes” automáticamente detectan el canal, salvo en los casos en que se forma una red “Ad-Hoc” o punto a punto cuando no existe Access Point.



Canal	Frecuencia
1	2.412
2	2.417
3	2.422
4	2.427
5	2.432
6	2.437
7	2.442
8	2.447
9	2.452
10	2.457
11	2.462

Tabla 3.1: Frecuencias de transmisión.

- **Tasas, velocidades**

El primer mecanismo opcional es DSSS-OFDM. Usa el preámbulo largo y corto definido en 802.11 y 802.11b, precediendo la parte de OFDM.

802.11g soporta muchas tasas de datos: 6, 12 y 24 Mbps obligatorio para OFDM. La parte de OFDM de 802.11g tiene tasas de datos de 18, 36, 48, 54 Mbps. La parte opcional CCK-OFDM de 802.11g proporciona una tasa de datos de 22 Mbps y 33 Mbps.

Velocidad hipotética	Rango(en ambientes cerrados)	Rango(al aire libre)
54 Mbit/s	27 m	75 m
48 Mbit/s	29 m	100 m
36 Mbit/s	30 m	120 m
24 Mbit/s	42 m	140 m
18 Mbit/s	55 m	180 m
12 Mbit/s	64 m	250 m
9 Mbit/s	75 m	350 m
6 Mbit/s	90 m	400 m

Tabla 3.2: Rangos y velocidades.

### 3.2.1. OFDM

La modulación OFDM [11] permite eliminar la interferencia entre símbolos denominada ISI, y reduce la complejidad de las técnicas adaptativas, lo que se combina con la característica de ortogonalidad de las portadoras. La utilización de las portadoras ortogonales permite por un lado lograr la identificación y el desvanecimiento selectivo y por otro obtener una mayor eficiencia espectral.

#### ■ Capa física

El estándar 802.11 opera en la frecuencia 2.4 GHz, con una tasa de datos de 1 y 2 Mbps usando DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) o FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Este estándar especifica la capa física OFDM, que divide la señal de información en 52 subportadoras para proporcionar una tasa de datos en la transmisión de 54 Mbps. Cuatro de las subportadoras son pilotos, que el sistema usa como una referencia para ignorar el cambio de frecuencia o fase de la señal durante la transmisión.

Las 48 subportadoras restantes proporcionan una separación para enviar la información en caminos paralelos. La frecuencia de espaciamiento es de 0.3125 MHz (tenemos 20MHz de ancho de banda con 64 subportadoras).

El principal objetivo de OFDM PHY es transmitir las MPDUs (Protocol Data Units) de la capa MAC (Media Access Control). La capa PHY se divide en dos elementos: PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) y PMD (Physical Medium Dependent). PLCP prepara las MPDUs para su posterior transmisión.

Debajo de la dirección PLCP, el PM proporciona la transmisión actual y la recepción de la capa física entre dos estaciones por medio inalámbrico (Figura 3.6).

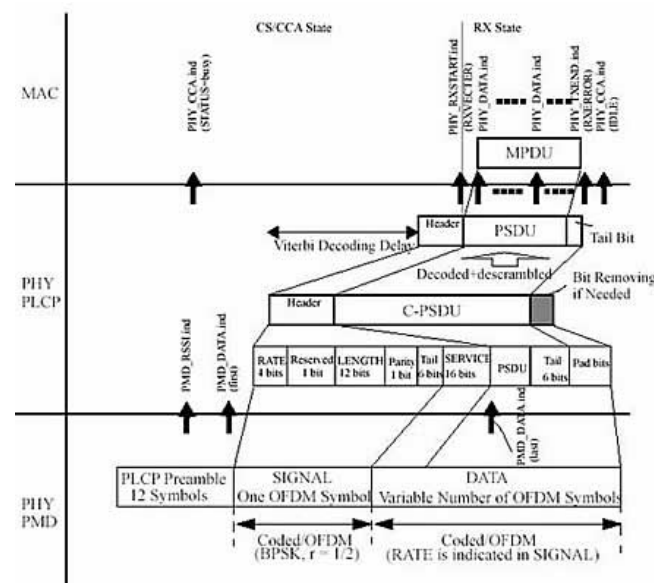


Figura 3.6: Capa física de OFDM.

- **Accesso canal**

El tiempo de un símbolo OFDM es de 4 microseg, con un tiempo de guarda de 800 ns. OFDM es un caso especial de la técnica de FDM (Frequency Division Multiplexing). Ambas se identifican por el uso de varias subportadoras repartidas por todo el ancho de banda. La única diferencia es la

mayor eficiencia espectral de OFDM respecto a FDM, puesto que en ésta primera las subportadoras son ortogonales entre ellas y se pueden solapar sin pérdida de información. OFDM es un conjunto de subportadoras ortogonales entre ellas y cada una de éstas modulada por otra técnica clásica de transmisión de datos, como podría ser BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM.

El funcionamiento de OFDM se puede resumir en los siguientes pasos:

- La información o bits de entrada se mapean según la modulación que se use para cada subportadora.
- Los símbolos obtenidos del mapeo y de duración de  $T_s$ , serán agrupados en  $M$  grupos de  $N$  subportadoras y serán enviados en paralelo, de  $N$  en  $N$  símbolos. Se ha pasado de una transmisión en serie a paralelo. Para que la tasa de transmisión sea igual en cada caso, se tendrá que incrementar el tiempo de símbolo en la transmisión en paralelo. Esto favorecerá que cada subportadora por separado vea un canal individual "flat fading" (uniforme, no selectivo en frecuencia), puesto que al aumentar el tiempo de cada una de ellas hará que el ancho de banda disminuya. Esto facilitará la ecualización.
- A continuación, cada símbolo es desplazado frecuencialmente según la subportadora a la cual se le asigne. Para cada una de ellas se precisa una frecuencia distinta, la cual ha de ser múltiple de  $R_s$ ; de esta forma se consigue la ortogonalidad. Por lo tanto, cada subportadora será multiplicada por una exponencial comprendida entre 0 y  $T$ , y de la frecuencia correspondiente a cada subportadora.
- Los resultados serán  $N$  sinusoides correspondientes a cada subportadora, al sumarlas se obtendrá una señal en el régimen temporal de

duración  $T$ . Ésta estará formada por el prefijo cíclico (PC), el cual ocupará la primera quinta parte del símbolo OFDM y el resto estará constituido por la información útil.

- A continuación la señal formada por  $NM$  símbolos con datos se trasladará a paso banda, se amplificará y se transmitirá.

### Ventajas e inconvenientes de la modulación OFDM

#### ■ Ventajas

Son ocasionadas por el hecho de repartir la información en varias subportadoras. De esta forma si una fuente de banda estrecha de ruido afectara a la comunicación, perjudicará a ciertas subportadoras pero no a todas, pudiendo recuperar los datos enviados.

En cambio, si el canal visto por la única portadora estuviese en desvanecimiento se perderá toda la información. Esto hace que OFDM sea robusta frente a canales con "frequency-selective fading" (selectivo en frecuencia), producida por el desvanecimiento multicamino. Esta característica también le otorga a OFDM una elevada tasa de transmisión.

Otra ventaja de la modulación es la gran duración de sus símbolos, incrementando las posibilidades de tener "flat fading", facilitando la ecualización y evitando la ISI.

#### ■ Inconvenientes

Estrictos niveles de precisión de sincronismo en tiempo y en frecuencia.

### 3.2.2. CCK(modulación por código complementario)

Cuando el estándar 802.11g usa la modulación CCK [11], la velocidad de transmisión es de 11 Mbps, que se basa en la técnica DSSS para la comunicación. La técnica DSSS, conocida como espectro ensanchado por secuencia directa, consiste en transmitir para cada bit enviado una secuencia de Barker <sup>1</sup> de bits (a veces llamado ruido pseudo aleatorio o PN). En esta operación, cada bit establecido en 1 es reemplazado por una secuencia de bit y cada secuencia de bit establecida en 0 es reemplazada por su complemento.

- Ventajas del DSSS:

- Permite mayores velocidades de datos (11 Mbps). - La itinerancia es menos complicada en comparación con los sistemas FHSS, ya que éstos siempre transmiten en un único canal.

- Inconvenientes del DSSS:

- En un área sólo pueden funcionar 3 sistemas de forma simultánea. - Necesita componentes más rápidos y caros que los sistemas FHSS equivalentes
- Más consumo y requisitos que los sistemas FHSS.

- Capa física

La capa física del estándar 802.11 define una secuencia de 11 bits (10110111000) para representar el 1 y para codificar el 0 usa su complemento (01001000111).

Cada bit que se codifica con esta secuencia se denomina chip o código de

---

<sup>1</sup>Los códigos Barker son un tipo especial de secuencia binaria óptima que se emplean para la compresión de impulsos de radar, ya que la función de autocorrelación da lóbulos laterales pequeños.

Los códigos empleados usualmente son binarios, lo que significa que solo hay dos fases diferentes, 0° y 180°. Los códigos binarios son secuencias de 0 y 1 ó 1 y -1 que vienen dados por la fase del subimpulso correspondiente.

chip. Esta técnica modula cada bit que tenga la secuencia de Barker.

#### ■ Acceso canal

El intervalo de frecuencias se divide en 13 (Europa) canales solapados, de 22 MHz de anchura, cada uno para una correcta transmisión de 11 Mbps, ya que, atendiendo el teorema de Shannon, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la señal para que se digitalice. Algunos canales se superponen con canales cercanos. Es por esto que generalmente se utilizan canales aislados (1, 6 y 11) que están a 25 MHz de distancia.

Por lo tanto, cuando dos puntos de acceso que usan los mismo canales tienen áreas de transmisión que se superponen, las distorsiones de señal pueden afectar las transmisiones. Para evitar cualquiera de estas interferencias, se recomienda distribuir los puntos de acceso y seleccionar canales de forma tal que dos puntos de acceso que usen el mismo canal nunca estén cerca.

La tecnología CCK, permite codificar directamente varios bits de datos en un solo chip al utilizar ocho secuencias de 64 bits. Por lo tanto, el método CCK puede alcanzar una velocidad máxima de 11 Mbps al codificar 8 bits de datos.

La tecnología CCK provee un mecanismo para incrementar la eficiencia del ancho de banda en un sistema de espectro extendido (spread spectrum). Esta técnica agrupa los bits de entrada en bytes (8 bits), equivalentes a 256 posibles símbolos. Si la velocidad de los datos de entrada es 11 Mb/s, se obtiene una velocidad de símbolos de  $11/8 = 1.375$  Msímbolos/s. Cada uno de estos símbolos es codificado a su vez con una secuencia de 8 nuevos

símbolos, cada uno de los cuales puede tener 4 valores. Estos últimos son modulados con QPSK (4 posibles fases). Como hay 4 posibles valores para cada uno de los 8 símbolos a modular, existen por lo tanto 48 son 65.536 posibles símbolos para codificar 256 valores. Esto permite elegir 256 símbolos que sean ortogonales entre sí, de manera que el receptor pueda tomar los 8 símbolos y fácilmente determinar a que conjunto válido corresponden (por ejemplo, calculando la correlación con las 256 símbolos posibles).

A la hora de transmitir las señales, el modulador del transmisor propaga las señales analógicas con una frecuencia central que corresponde al canal de radio seleccionado por el usuario. En el cuadro 3.1 se muestran la frecuencias centrales para cada canal.



Estándar	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi
IEEE spec.	802.15.1	802.5.4	802.11a/b/g
Banda de frecuencia	2.4 GHz	868/965 MHz; 2.4GHz	2.4GHz; 5GHz
Máxima tasa	1 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s
Rango nominal	10 m	10-100 m	100 m
Potencia de transmisión	0-10 dBm	(-25)-0 dBm	15-20 dBm
Número canales de RF	79	1/10; 16	14(2.4 GHz)
Ancho de banda del canal	1 MHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22 MHz
Tipo de modulación	GFSK	BPSK(+ ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK, COFDM, CCK, M-QAM

Tabla 3.3: Comparación de Bluetooth, ZigBee y protocolos Wi-Fi.

Acrónimos usados en la tabla 3.3:

ASK: Amplitude Shift Keying, GFSK: Gaussian frequency-shift keying, BPSK/QPSK: Binary/ Quadrature Phase SK, O-QPSK: offset-QPSK, OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM: coded OFDM, CCK: Complementary Code Keying.

# Capítulo 4

## Entorno de la simulación ISM

### 4.1. Introducción

La herramienta usada para realizar todas estas simulaciones es el programa Matlab. Es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Se ha usado en la plataforma Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets). Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de

programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL <sup>1</sup>.

La aplicación Simulink es un entorno de programación visual, es decir, brinda los conocimientos necesarios para diseñar y desarrollar aplicaciones con un entorno visual amigable y fácil de utilizar para el usuario. Los lenguajes de programación visual tienden a facilitar la tarea de los programadores, dado que con los primeros lenguajes de programación crear una ventana era tarea de meses de desarrollo y de un equipo de trabajo.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de "model").

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Se emplea arduamente en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica.

En la simulación a realizar, usando la herramienta Simulink, se va a tratar de hacer una simulación teniendo en cuenta todos los módulos involucrados en la transmisión y teniendo en cuenta todos los tamaños de los paquetes transmitidos y los tiempos de cada una de las tecnologías, es decir, tanto de Bluetooth, como de las distintas modulaciones usadas en la tecnología Wifi para el estándar

---

<sup>1</sup>VHDL es el acrónimo que representa la combinación de VHSIC y HDL, donde VHSIC es el acrónimo de Very High Speed Integrated Circuit y HDL es a su vez el acrónimo de Hardware Description Language. Es un lenguaje usado por ingenieros definido por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) que se usa para diseñar circuitos digitales.

802.11g. También se atenderán a los diferentes tipos de canales que se pueden tener, Gauss y Flat Fading, es decir, con o sin dispersión.

## 4.2. Modelado de las distintas tecnologías inalámbricas

### 4.2.1. Bluetooth - IEEE 802.15.1

Nuestro objetivo es desarrollar un modelo de simulación de la capa física y capa de acceso al medio (MAC) para sistemas de redes de área personal Bluetooth [1]. Para ello la simulación la hemos realizado mediante el programa simulink.

Al finalizar esta simulación los resultados que se esperan obtener son:

1. Comprender el funcionamiento de la capa física y MAC de Bluetooth. Identificar los límites de operación del sistema de la capa física de Bluetooth. Identificar las fuentes de problemas en el enlace y como se manifiestan dichos problemas.
2. Conocer el comportamiento de la capa física en coexistencia con otras tecnologías que trabajan en el mismo espectro de frecuencias, como IEEE802.11g.
3. Disponer de una herramienta para el análisis de redes de área personal Bluetooth tanto para el campo de la investigación como por ejemplo para planear una mejor implementación de una PAN (“Personal Area Network”) Bluetooth o mejoramiento de esta tecnología y como para lo educativo, comprendiendo de una forma mas fácil y rápida, el funcionamiento de este tipo de redes.

Para la realización de esta simulación, hemos tenido en cuenta 1 maestro y 2 esclavos. En el maestro se generan en frecuencias pares y los esclavos en las frecuencias impares. Estas frecuencias se generan en el la clase randimp.

Vamos a comentar cada uno de los módulos usados para la realización de la simulación donde se puede ver cada uno en la figura 4.4:

### Fuente de los datos binarios

Se generan datos con un periodo de bit de 1.5 microseg y las muestras que se generan cada ese período de bit son 10 muestras/trama.

En la figura 4.1 mostramos los bloques que componen este módulo.

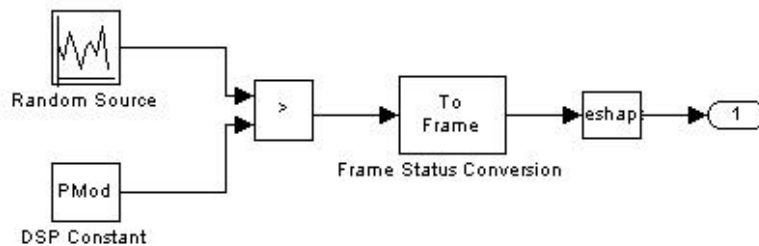


Figura 4.1: Bloques que componen la fuente de datos binarios.

### Codificador cíclico

Donde entran 10 bits y salen 15 bits. También se intenta detectar y corregir los errores mediante el código Hamming (15,10). Este código detector y corrector de errores se refiere a los errores de transmisión en las líneas que se deben a mucho factores, como el ruido térmico, ruido impulsivo y ruido de intermodulación. Dependiendo del medio de transmisión y del tipo de codificación empleado, se pueden presentar otros tipos de anomalías como ruido de redondeo y atenuación,

así como cruce de líneas y eco.

Hay dos estrategias diferentes para el tratamiento de los errores:

- Códigos detectores de error: Consiste en incluir en los datos transmitidos, una cantidad de bits redundantes de forma que permita al receptor detectar que se ha producido un error, pero no qué tipo de error ni donde, de forma que tiene que solicitar retransmisión.
- Códigos correctores de error: Consiste en la misma filosofía que el anterior, incluir información redundante pero en este caso, la suficiente como para permitirle al receptor deducir cual fue el carácter que se transmitió, por lo tanto, el receptor tiene capacidad para corregir un número limitado de errores.

En cuanto a la corrección de errores, el código Hamming, que fue desarrollado por R.W. Hamming en 1950, y se basa en los conceptos de bits redundantes y Distancia Hamming.

Un Hamming puede utilizarse en mensajes de caracteres de cualquier longitud, que por ejemplo para caracteres ASCII de 7 bits y paridad par, necesitamos 4 bits, que se situaran en las posiciones 1,2,4 y 8 (posiciones potencia de 2). Nos referimos a los bits redundantes como r1,r2,r4 y r8.

### **Ensamblador de paquetes**

Se convierten las muestras escalares de entrada a tramas de salida a una menor frecuencia de muestreo. Se ensamblan paquetes de 625 bits a 1Mbps, teniendo a la entrada 15 muestras.

### Hop Index

Se basa en la generación de las frecuencias. Debido a que la banda ISM es de uso libre, los sistemas de radio deben coexistir con varios dispositivos que provocan interferencia, como por ejemplo monitores de bebés, controles de puertas de garajes, teléfonos inalámbricos y hornos microondas. Estas interferencias pueden ser evitadas, buscando espacios no usados en el espectro. Bluetooth usa saltos de frecuencia (FH) espectro disperso, tecnología que posibilita implementaciones de radio de bajo costo y baja potencia. Éste sistema divide la banda de frecuencia en varios canales de salto, donde, los transmisores, durante la conexión van cambiando de uno a otro canal de salto de manera pseudo-aleatoria. Con esto se consigue que el ancho de banda instantáneo sea muy pequeño y también una propagación efectiva sobre el total de ancho de banda. En conclusión, con el sistema FH se pueden conseguir transmisores de radio de banda estrecha con una gran inmunidad a las interferencias.

Particularizando en nuestra simulación, las frecuencias son generadas llamando a una clase externa llamada `randimp`. Las frecuencias generadas para el maestro deben ser pares, como hemos comentado anteriormente, y estas son generadas llamando de la siguiente forma a la función, `randimp(1,100,39)*2`, en la cual se genera una matriz `[1,1,100]` donde cada vector `[1,:,100]` contiene 100 números aleatorios enteros impares sin repetición entre 1 y 39, que es la frecuencia máxima. Las frecuencias generadas para el esclavo deben ser impares. Las frecuencias generadas para cada uno de los esclavos y del maestro son guardadas en unas variables en el simulink, que serán usadas posteriormente en la generación de las señales programadas en Matlab. Estas variables se llaman `Hop_Frecuency_Es1`, `Hop_Frecuency_Es2` y `Hop_Frecuency_maestro`, respectivamente.



## Modulador

Formado por varios bloques:

### 1. Modulación GFSK:

La modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (en inglés Gaussian Frequency Shift Keying o GFSK), es un tipo de modulación donde un 1 lógico es representado mediante una desviación positiva (incremento) de la frecuencia de la onda portadora, y un 0 mediante una desviación negativa (decremento) de la misma.

En GFSK la información es pasada por un filtro gaussiano antes de modular la señal. Esto se traduce en un espectro de energía más estrecho de la señal modulada, lo cual permite mayores velocidades de transferencia sobre un mismo canal. La desviación máxima de frecuencia está entre 140 KHz y 175 KHz. La modulación se ilustra en el siguiente gráfico (Figura 4.2):

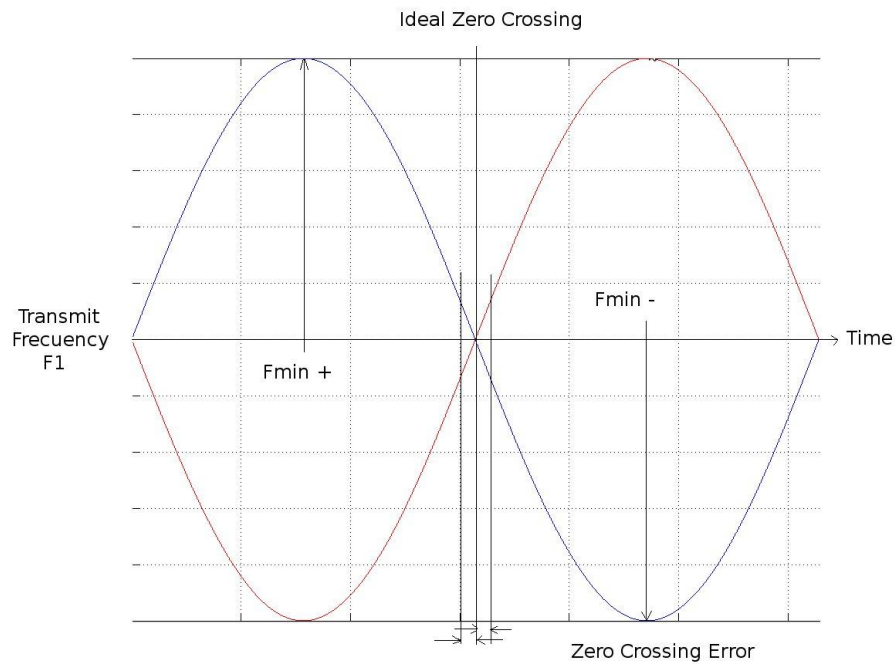


Figura 4.2: Modulación GFSK

## 2. Generación de portadoras

Se generan 79 portadoras de -39Mhz a 39Mhz, en las frecuencias de paso generadas para cada maestro y esclavo (lo que llamamos en la simulación Hop Index). La frecuencia de separación entre cada uno es de 1 microseg y las muestras por símbolo son  $6.25e4$ .

En la figura 4.3 se muestra los bloques que forman el módulo del Modulador.

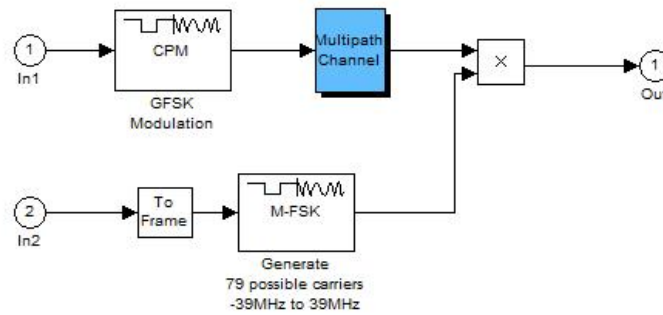


Figura 4.3: Esquema del modulador

A continuación mostramos las figuras de los bloques de la simulación para el maestro (Figura 4.4):

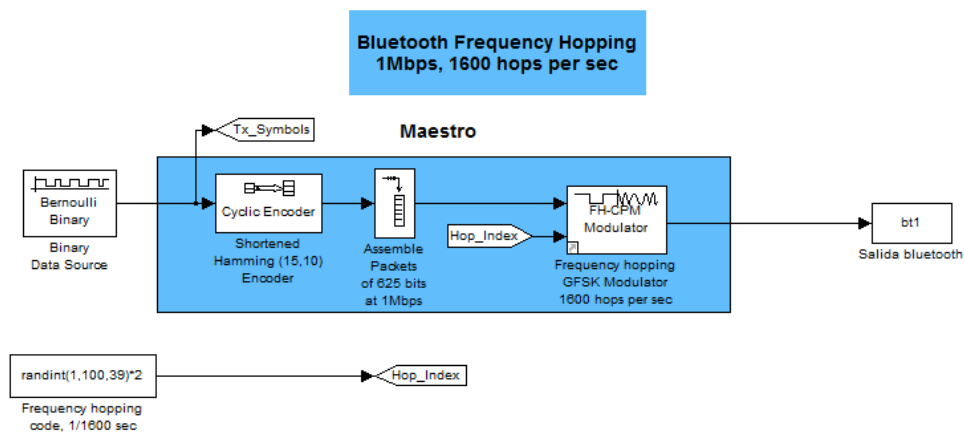


Figura 4.4: Esquema Simulink para transmisión del maestro Bluetooth

Estos bloques, los de la figura 4.4, son los mismos para los esclavos solo cambiando las frecuencias que llegan al bloque Hop Index, como mostramos en la figura 4.5.

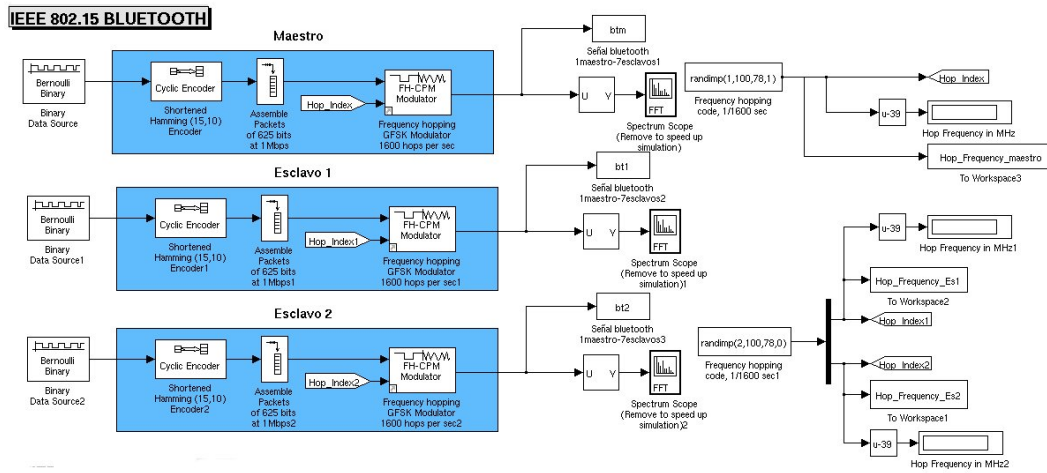


Figura 4.5: Esquema Simulink para transmisión Bluetooth

El canal es el mismo para las dos tecnologías (Bluetooth y Wifi). Tienen la misma SNR, que le ponemos un valor bastante alto para poder ver mejor la señal de salida, sin prácticamente ruido ( $SNR = 100$ ), y misma frecuencia de muestreo,  $4e-8/7$ .

Al modificar la frecuencia de muestreo, debemos modificar las muestras por símbolo, del bloque de generación de portadoras, de  $6.25e4$  a  $7*6.25e4/4$ , y también las muestras por símbolo que se generan en la modulación GFSK de 100 a  $700/4$ .

En esta figura 4.6 solo se tiene en cuenta dos esclavos y el maestro, ya que para la posterior comparación entre las señales generadas en Simulink y Matlab, solo contaremos con dos esclavos.

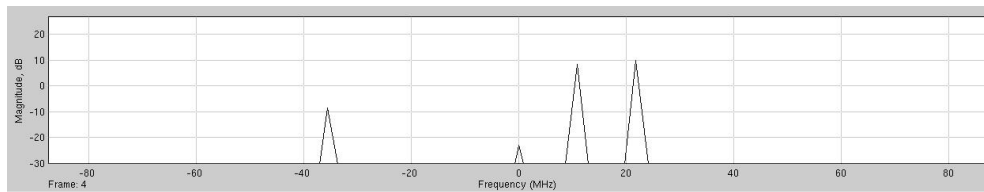


Figura 4.6: Señal Bluetooth obtenida del Simulink teniendo en cuenta solo dos esclavos

### 4.2.2. Wifi - IEEE.802g

Para la realización del estándar completo [11], partimos de dos referencias o modelos, ya que este estándar, el IEEE 802.11g, tiene una combinación de los módulos de los estándares IEEE 802.11a y IEEE 802.11b, de los que solo necesitamos el transmisor.

## OFDM

### Generación de la señal y trama OFDM

Los datos son generados aleatoriamente con un bloque Bernoulli Binary Generator. Este bloque genera datos a una tasa de 54 Mbits/s. Como se ve en la tabla 4.7, el número de bits de datos por símbolo OFDM son 216.

Data rate (Mbps)	Modulation	Coding Rate	Coded bits per sub-carrier	Coded bits per OFDM symbol	Data bits per OFDM symbol
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Figura 4.7: Parámetros dependiendo de las tasas de modulación.

- Parámetros del sistema OFDM:

Las modulaciones utilizadas en las subportadoras de este sistema OFDM

Parámetros	Valores
$N_D$ : Número de subportadoras de datos	48
$N_P$ : Número de subportadoras con pilotos	4
$N_T$ : Número de subportadoras de datos	$64(N_D + N_P + 12)$
$P_{FFT}$ : Puntos de la FFT/IFFT	$64(N_T)$
$A_f$ : Ancho de banda de cada subportadora	$0.3125 \text{ MHz}(20\text{MHz}/64)$
$T_{FFT}oT_U$ : Período IFFT/FFT(tiempo útil)	$3.2 \mu s(1/A_f)$
$T_{PC}$ : Duración del prefijo cíclico	$0.8 \mu s(T_{FFT}/4)$
$T$ : Duración del símbolo OFDM	$0.4 \mu s$
$T_{LP}$ : Duración del Long Preamble	$3.2 \mu s(1/A_f)$
$T_{CP2}$ : Duración del prefijo cíclico de la TS	$1.6 \mu s$
$T_{TS}$ : Duración de la TS	$8 \mu s(T_{CP2} + 2T_{LP})$
$T_{Sampling}$ : Tiempo de muestreo	$0.05 \mu s(T_U/64)$

Tabla 4.1: Frecuencias de transmisión.

serán BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM. Para cada una de ellas se generará un vector aleatorio de ceros y unos, cuya longitud será proporcional al número de subportadoras de datos ( $N_D$ ), al número de símbolos OFDM ( $N_s$ ) que se deseen enviar y al número de bits por símbolo de la modulación.

Una vez generada la información, se mapeará según la modulación y se agruparán en conjuntos de 48 símbolos, correspondientes al número de subportadoras con datos por símbolo OFDM.

En el siguiente paso se generará la señal en el dominio temporal. Se hará a través de la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Para que esto sea factible, se incrementará cada conjunto de 48 símbolos a un número total de subportadoras que sea potencia de 2. Por lo tanto, se añadirán 12 para realizar el “zero padding” y 4 más correspondientes a los pilotos; siendo 64 potencia de 2. En la tabla 4.1 se muestran los parámetros para de cada símbolo OFDM.

## IFFT

Se usan 64 puntos. El estándar define una numeración para las entradas de la IFFT, la cual consiste en copiar los primeros 26 coeficientes (del -26 hasta el -1) del símbolo OFDM en las entradas 38 hasta la 63 del bloque IFFT (figura 4.8) y el resto de coeficientes, del 1 al 26, se introducirán en las entradas con su misma numeración. Respetando los cuatro pilotos, que estarán situados en las entradas 8, 22, 44 y 58 y con valores 1, -1, 1 y 1, respectivamente. El resto de entradas valdrán cero, correspondientes al "zero padding".

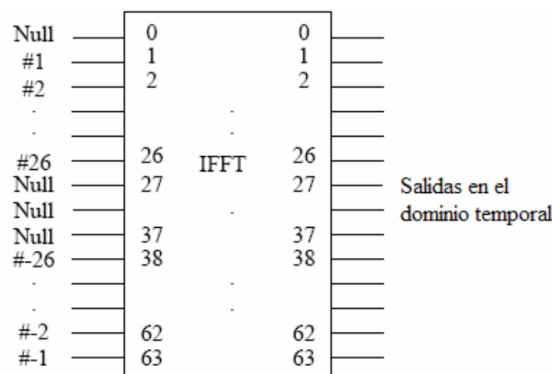


Figura 4.8: Módulo IFFT.

Una vez se ha aplicado la IFFT a todos los símbolos OFDM, se añadirán los prefijos cíclicos y el "Long Preamble.<sup>en</sup> el dominio temporal.

## Prefijo cíclico

El objetivo de los prefijos cíclicos es el de eliminar por completo la ISI introducida por el multicamino. Este efecto, incrementa la respuesta del canal debido a los múltiples ecos, que al convolucionarlo con el símbolo OFDM hace que se



alargue e interfiera en el siguiente. Por lo tanto, se tendría que introducir un margen de seguridad entre símbolos, el cual estará emplazado al principio de cada símbolo OFDM al que ha de proteger y estará formado por una copia de sus últimas muestras en el régimen temporal.

En la figura 4.9 se muestra la estructura de la trama de señal transmitida en una comunicación OFDM basada en este sistema. Está formada por los símbolos OFDM, la secuencia de entrenamiento y los prefijos cíclicos.

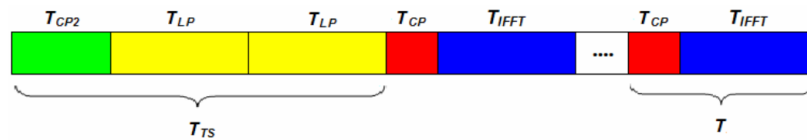


Figura 4.9: Prefijo cíclico.

$T_{IFFT}$  es la duración de un símbolo OFDM sin contar su prefijo cíclico, es decir, es el tiempo correspondiente a la duración de la información útil ( $T_u$ ).

En la figura 5.4, se muestran todos los bloques que hemos introducido para realizar la simulación, con la herramienta Simulink, del transmisor.

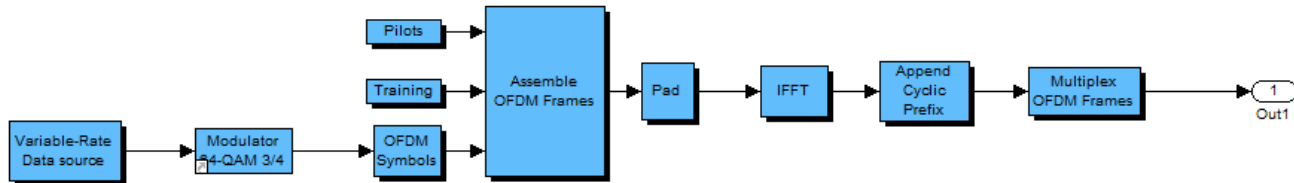


Figura 4.10: Módulos que componen el transmisor OFDM.

Para terminar la explicación de la simulación para OFDM, se muestra el sistema completo (fig 4.11), es decir, el bloque primero, donde se encuentran los módulos anteriores (fig 5.4), junto con el producto del filtro, con el que conseguimos quedarnos con la señal que necesitamos, ya que antes lo multiplicamos por 7 deltas, y el seno, que nos ayuda a desplazar la señal a la frecuencia necesaria.

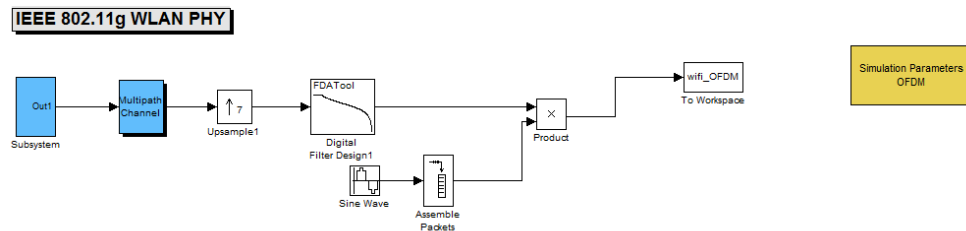


Figura 4.11: Sistema completo para el transmisor OFDM.

En la figura 4.12 se observa la señal que se obtiene al generar la señal con la herramienta Simulink.

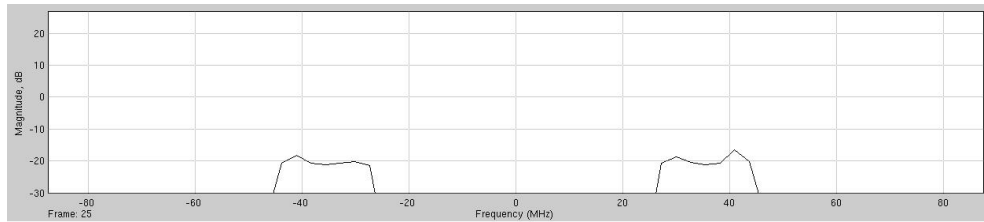


Figura 4.12: Señal OFDM obtenida del Simulink

## CCK

Como en los otros apartados, vamos a explicar cada uno de los bloques que forman el CCK [11]. En la figura 4.13 se muestra de forma resumida.

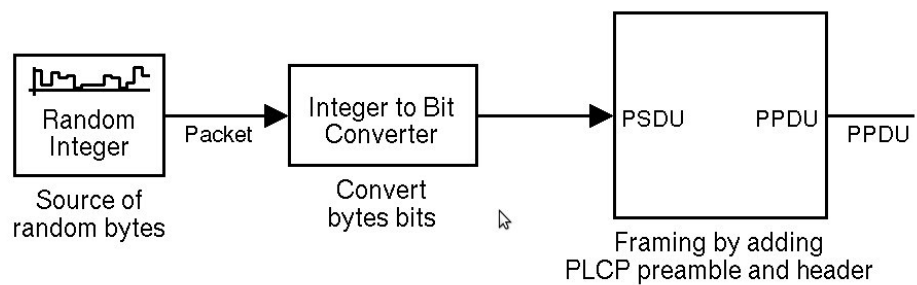


Figura 4.13: Bloques que componen el transmisor CCK.

### Fuente de bytes aleatorios

Es el primer bloque que forma la parte del transmisor (figura 4.13), en el cual se generan números enteros uniformemente distribuidos. A la salida obtenemos paquetes de bytes, los cuales están formados por 1024 bytes.

### Conversión de bytes a bit

Los paquetes de bytes recibidos son convertidos a bits, donde 8 bits corresponden con un entero.

### Adición de preámbulo y cabecera (PLCP)

PLCP, Physical Layer Convergence Procedure, es una de las subcapas en que se divide la capa física, la otra es la subcapa PMD, Physical Medium Dependent, por donde se transmiten las tramas. En la subcapa PLCP es en donde se introducen la cabecera y el preámbulo a LA MPDU (Management Protocol Data Unit), procedente de la capa superior MAC, en el medio físico. Se puede observar de forma gráfica en la figura 4.14.

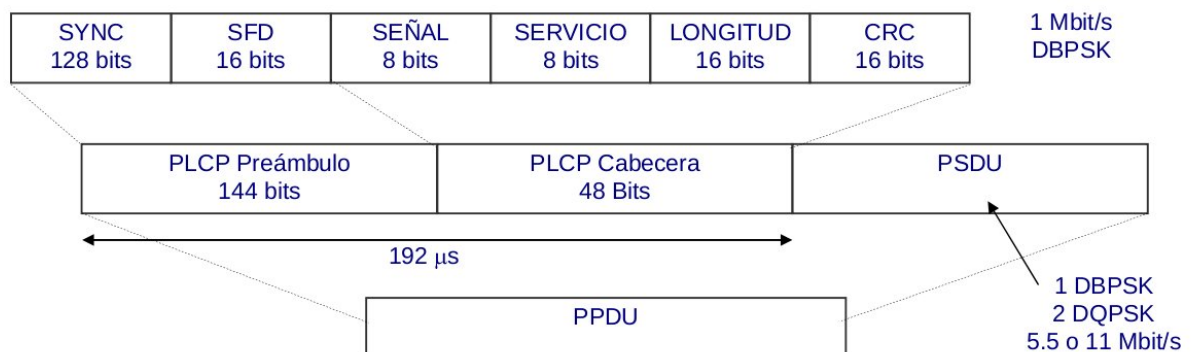


Figura 4.14: Generación del paquete PPDU.

En la figura 4.15, se puede ver como se transmiten los paquetes por la capa física y donde se añaden las cabeceras y preámbulos, para obtener el paquete PPDU.

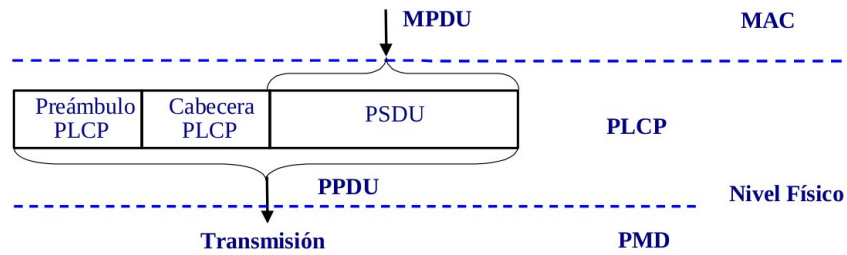


Figura 4.15: Subcapas de la capa física.

Los siguientes bloques que forman parte de la tecnología CCK se muestran en la figura 4.16.

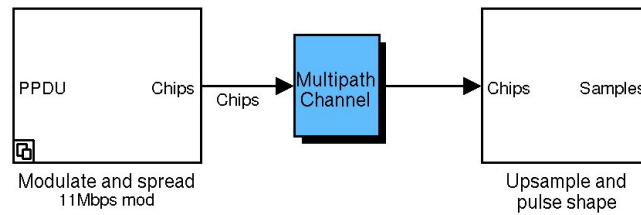


Figura 4.16: Bloques que componen el transmisor CCK.

## Modulador

Como podemos observar en la figura 4.17, una vez que entran los paquetes en este bloque, el preámbulo y la cabecera se separan de los datos. Los datos son modulados, y a la salida de este, se juntan otra vez para dar lugar a chips.

Cada chip es un par de bits complejos que obtenemos de la modulación QPSK a una tasa de chip de 11Mchip/s. Tras la modulación se obtienen 8 símbolos,  $c_0 \dots c_8$ , donde

$$C = (c_0, \dots, c_7) =$$

$$(e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_3+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_3+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_4)}, -e^{j(\phi_1+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_3)}, e^{j(\phi_1+\phi_3)}, \\ -e^{j(\phi_1+\phi_2)}, e^{j\phi_1})$$

y  $\phi_1, \dots, \phi_4$  están determinados por los bits que son modulados.

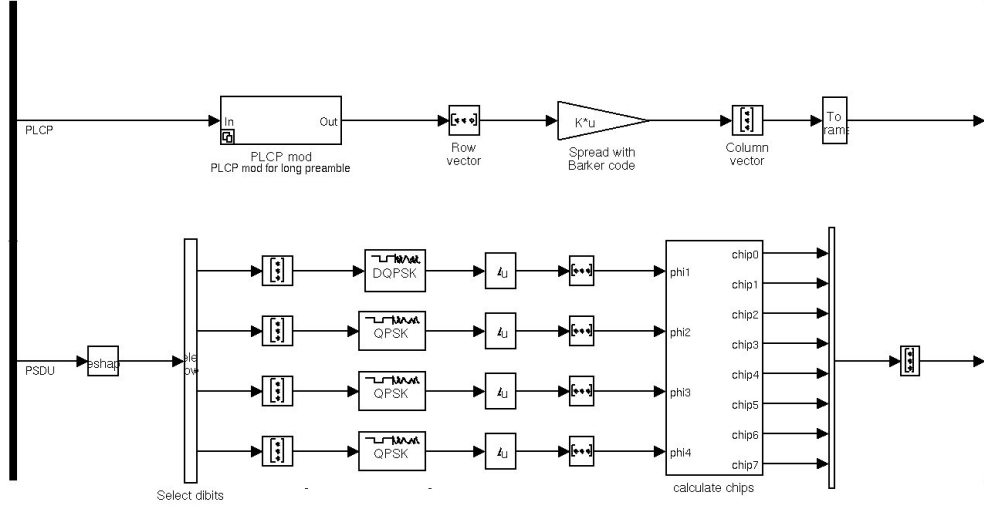


Figura 4.17: Bloques que forman el modulador.

## Canal

El canal (fig 4.16), como hemos dicho anteriormente, es el mismo para las otras tecnologías y contiene los mismos valores para los diferentes parámetros.

## Cambio a muestras

En este último bloque lo que se intenta es ensamblar los chips para que a la salida se obtengan muestras y que la forma de la señal sea más o menos un pulso. La tasa de velocidad utilizada, es la correspondiente a la velocidad para esta tecnología, de 11 Mbps. En la figura 4.18 mostramos el esquema completo del transmisor que hemos utilizado en nuestra simulación.

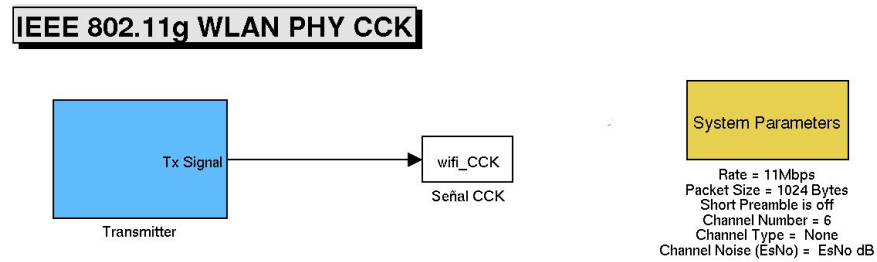


Figura 4.18: Esquema del transmisor CCK.

En la figura 4.19 se observa la señal que se obtiene al generar la señal con la herramienta Simulink, teniendo en cuenta que el canal que se está usando es el 1, que corresponde con la frecuencia 2.412 GHz.

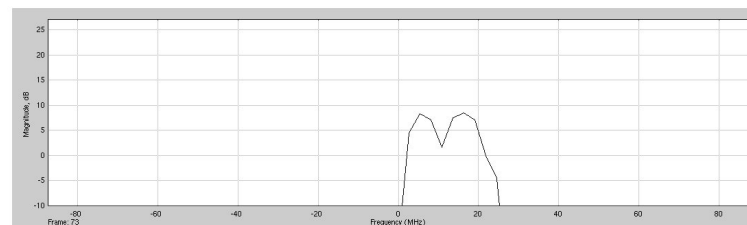


Figura 4.19: Señal CCK obtenida del Simulink



### 4.3. Representación conjunta de las tres señales generadas en Simulink

Para la representación conjunta de las señales, se programó una función en Matlab que recibía los vectores de las señales generadas en simulink, pero eligiendo para el caso de Bluetooth el último hop. Partíamos de que un hop son  $625 \mu\text{seg}$  y estas corresponden en el simulink a 109375 muestras. De este modo podemos saber que el cuarto hop correspondía al rango de muestras desde  $109375 * 3 + 1$  hasta 437500 (este es el tamaño total del vector). Se podría haber elegido cualquier de los cuatro hops, el primer hop sería  $109375 + 1 : 109375 * 2$  o el segundo  $(109375 * 2) + 1 : 109375 * 3$ .

En el caso de las señales de ofdm y de cck se extrajo de los vectores originales solo 5000 muestras, pero podría a ver sido cualquier otro tamaño.

En esta representación se pretendía dibujar el espectro de las señales de la parte positiva de cada una de ellas, por lo tanto una vez extraídas las señales se debía calcular los espectros de cada una de las señales y elegir la mitad la mitad positiva. En la figura 4.20 se observa la representación de las señales. La señal que aparece en rojo corresponde a la señal Bluetooth, en verde a la señal Wifi usando la modulación OFDM y en azul a la señal Wifi usando la modulación CCK. Todo esto en función de la frecuencia, en el rango de 0 y  $\pi$  y las amplitudes en decibelios.

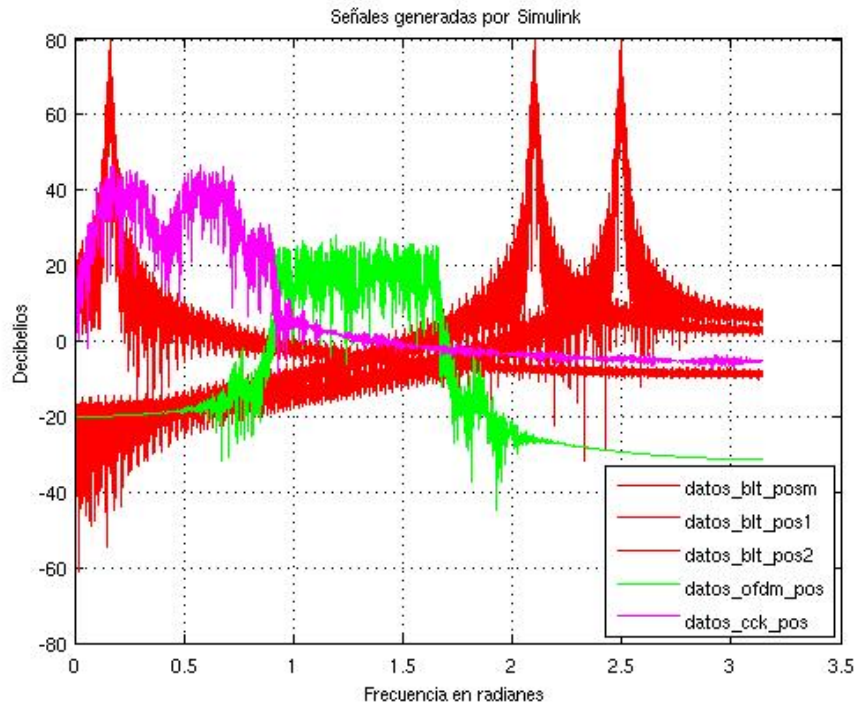


Figura 4.20: Señales obtenidas en el simulink

## 4.4. Resumen

En este capítulo se ha presentado un modelo Simulink, del cual solo contábamos con los datos teóricos obtenidos en la fase de estudio y unos pequeños modelos que sirvieron de guía para la realización completa de todos los transmisores, pero aún así se encontraron varios problemas, ya que primeramente era necesario entender perfectamente el funcionamiento teórico y luego tener muy claro los bloques que debían formar parte del transmisor. El modelo en el que hubo mayor problema para su correcto funcionamiento, fue para la modulación CCK, ya que era totalmente desconocido para mí y la documentación con la que se contaba no era demasiado clara.

Se han llevado a cabo simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento de

los transmisores, cambiando las frecuencias centrales de cada una de las señales y comprobando gráficamente que se correspondían. Estas gráficas realizadas son como las que se muestran en la figura 4.20.

# Capítulo 5

## Estimación espectral paramétrica de señales en el canal ISM

### 5.1. Introducción

En este capítulo se describe un algoritmo basado en la estimación paramétrica para una serie temporal compuestas de varias señales procedentes de transmisores en la banda ISM, tal y como se describen en el capítulo 2 y 3. Estas señales se sistematizan en Matlab mediante el simulador descrito en el capítulo 4.

Se supone que se dispone de información acerca de las señales a estimar, en concreto se conocen las autocorrelaciones de las señales. Para ello es posible estimar un modelo basado en una estimación lineal de estas autocorrelaciones. Este modelo supone además que existe un canal para cada señal.

El algoritmo pretende estimar los parámetros relacionados con las señales y con los canales. Para ello se debe minimizar una función de coste sobre una medida de parecido entre la señal y el modelo. Es deseable que la función de coste sea convexa para asegurar que existe una solución única. Se utilizará el coste cuadrático sobre la distancia euclídea, ya que esta función es matemáticamente tratable y

produce interpretaciones analíticamente [3].

## 5.2. Generación de las funciones de autocorrelación

### 5.2.1. Bluetooth

Observando las señales que se generaron en simulink, la autocorrelación de la señal se asemeja a una gaussiana. La ecuación de una gaussiana en función del tiempo se define en la ecuación (5.3).

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5.1)$$

Esta gaussiana hay que ponerla en función del tiempo. Sabiendo que el tiempo de símbolo,  $T$ , es  $T = \sigma$ , y posicionándola en el origen, la ecuación resultante es:

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}T^2} \exp\left[-\frac{t^2}{T^2}\right] \quad (5.2)$$

La versión muestreada, donde  $\tau$  es el período de símbolo,

$$G(n\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}T^2} \exp\left[-\frac{n^2}{\left(\frac{T}{\tau}\right)^2}\right] \quad (5.3)$$

La varianza ( $\sigma$ ) tiene un valor de  $10^{-6}$ , ya que la velocidad de cada Bluetooth es de  $10^6$  baudios. Pero esta frecuencia hay que transformarla a tiempo discreto teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo utilizada en la simulación del Simulink. El ancho de banda considerado en un entorno continuo es de 87 MHz, por lo que en virtud del teorema de muestreo de Nyquist, la frecuencia de muestreo deber ser al menos de 175 Mmuestras/segundo.

Tras la generación de la gaussiana se debe de modular a la frecuencia deseada, que corresponde a la frecuencia correspondiente del Simulink. La forma de modular una señal es multiplicando, en este caso la gaussiana, por un coseno. Para obtener el valor de la frecuencia la frecuencia portadora, debemos tener en cuenta la ecuación (3.1).

Después de modular la señal se construye la matriz de Toeplitz de la señal resultante que se usará en la estimación.

Este procedimiento se debe hacer tres veces, ya que simulamos dos esclavos y el maestro, pero con distintas frecuencias, que obtenemos de las variables que se generan en el simulink.

En la figura 5.1 se muestran las tres señales de los tres dispositivos Bluetooth, representadas en el dominio de la frecuencia, en el rango de 0 a  $\pi$ .

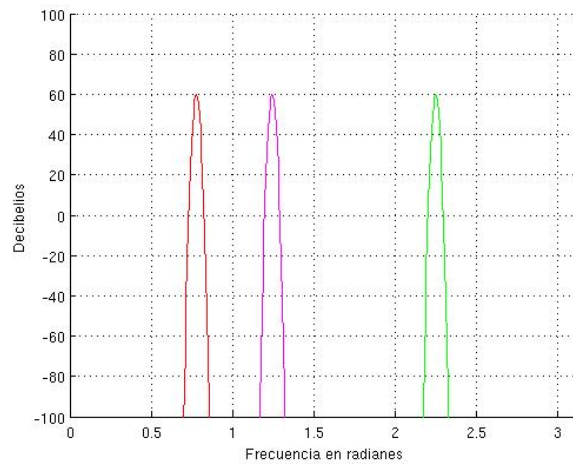


Figura 5.1: Representación de las estimaciones de las señales Bluetooth.

### 5.2.2. OFDM

En la capa física, como se comentó en el capítulo 3, se establece la utilización de 64 subportadoras, de las cuales 48 son utilizadas para datos, 4 son pilotos y 12 son nulas. Las subportadoras pilotos son utilizadas como referencia para minimizar los desplazamientos de frecuencia y fase. Por último las 12 subportadoras nulas son utilizadas para resguardo de la banda y la frecuencia DC, que corresponde a la frecuencia central del canal (ver figura 5.2).

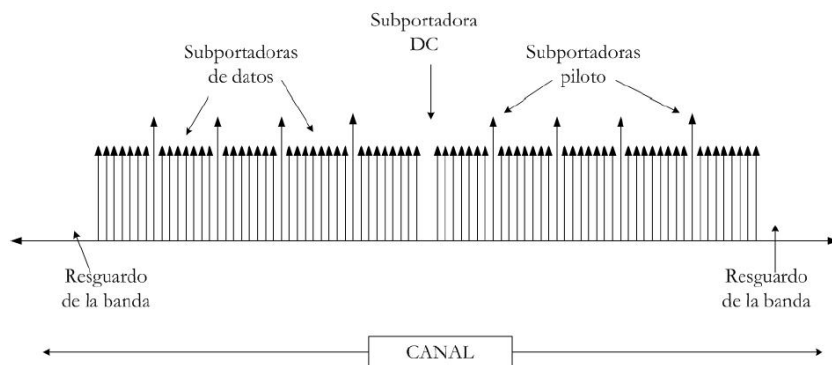


Figura 5.2: Subportadoras de la modulación OFDM.

Lo que se muestra en la figura 5.2 corresponde a OFDM en el dominio de la frecuencia, que es lo que se trata de programar. Como se puede observar se genera un pequeño desvanecimiento en la frecuencia central del canal. Por lo tanto, el espectro de la señal en banda base se asemeja a la convolución de dos señales rectangulares moduladas por un coseno:

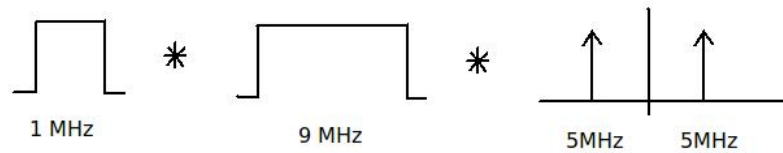


Figura 5.3: Convolución de dos señales rectangulares moduladas por un coseno.



Esto da como resultado la figura 5.4.

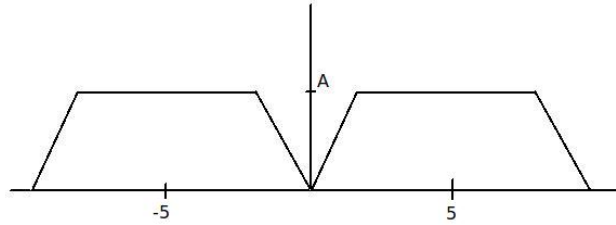


Figura 5.4: Resultado de la convolución de las dos señales rectangulares moduladas por un coseno.

Este espectro de la señal se puede comprobar que es prácticamente igual a la señal correspondiente de la figura 4.20.

Para generar esta señal es necesario realizar la convolución de dos pulsos de diferente tamaño, uno con una anchura de 1 MHz y el otro de 9 MHz para obtener los 10MHz necesarios. Estos pulsos se convolucionan a su vez con dos deltas con una diferencia entre ellas de 10, ya que el ancho de banda para cada elemento OFDM es de 20 MHz. Su expresión analítica se muestra en la ecuación (5.4)

$$S(w) = \Pi\left(\frac{w}{2\pi 10^6}\right) * \Pi\left(\frac{w}{2\pi 9 \cdot 10^6}\right) * (\delta(w - 5 \times 10^6) + \delta(w + 5 \times 10^6)) \quad (5.4)$$

Calculando su transformada de Fourier y muestreando, obtenemos la autocorrelación de la señal OFDM.

$$r_{OFDM}(n) = A \cos\left(\frac{2\pi 5}{175}n\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi}{175}n\right) \text{sinc}\left(\frac{16\pi}{175}n\right) \quad (5.5)$$

La frecuencia a la cual hemos centrado la señal OFDM es de 37 MHz, frecuencia correspondiente a la frecuencia central de la señal wifi usando la modulación OFDM en Simulink. OFDM en los canales que mejor trabaja, es decir, donde menos interferencias se producen entre los elementos, son el 1, el 6 y el 11, corres-

pondientes a las frecuencias 2.412 GHz, 1.437 GHz y 2.462 GHz respectivamente. Por este motivo se centra en la frecuencia de 37 MHz.

Calculando su transformada de Fourier y muestreando, obtenemos la autocorrelación de la señal OFDM.

$$r_{OFDM}(n) = A \cos\left(\frac{2\pi 5}{175}n\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi}{175}n\right) \text{sinc}\left(\frac{16\pi}{175}n\right) \quad (5.6)$$

Posteriormente, después de modular la señal, se construye la matriz de Toeplitz de la señal resultante q se usará en la estimación.

En la figura 5.5 se muestra la señal del dispositivo Wifi usando la modulación OFDM, representada en el dominio de la frecuencia, en el rango de 0 a  $\pi$ .

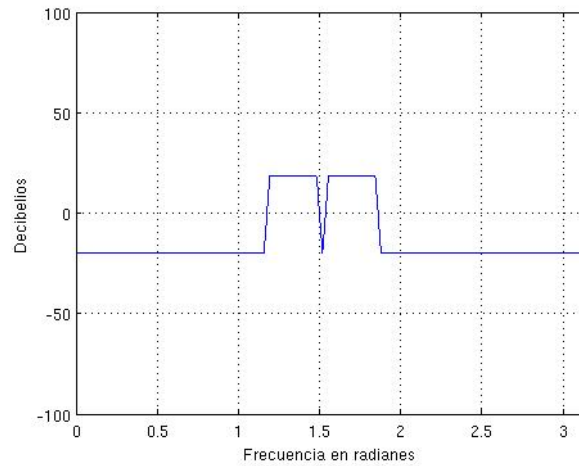


Figura 5.5: Representación de la estimación de la modulación OFDM.

### 5.2.3. CCK

Para la realización de esta señal hemos generado un tren de pulsos en raíz de coseno alzado modulado. Por lo tanto la autocorrelación se convoluciona con la

transformada inversa de Fourier de la señal coseno alzado.

Para la generación de la autocorrelación se simula un pulso en raíz cuadrada de coseno alzado.

Los parámetros utilizados para la generación del filtro han sido: la frecuencia de muestreo, el factor de atenuación, que por defecto es de 0.5, y el retraso de filtro por defecto es 3frecuencia de muestreo en segundos. Además hay que tener en cuentas que el vector del filtro generado tiene que tener el mismo número de muestras que los otras señales. Todos estos parámetros son los necesarios para usar la función rcosine en Matlab.

Como en los casos anteriores en las generaciones de las otras señales, hay que modular la señal y luego construir la matriz de Toeplitz de la señal resultante q se usará en la estimación.

En la figura 5.6 se muestra la señal del dispositivo Wifi usando la modulación CCK, representada en el dominio de la frecuencia, en el rango de 0 a  $\pi$ .

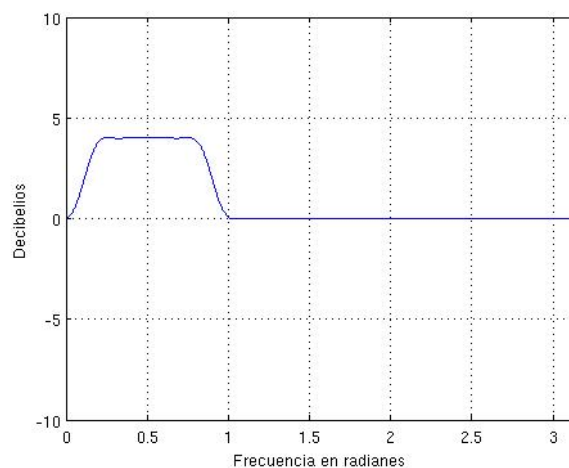


Figura 5.6: Representación de la estimación de la modulación CCK.

En la gráfica 5.7 se representan las dos formas en que se han generado las señales, pudiéndose observar que coinciden totalmente y pudiendo de esta forma afirmar que se ha conseguido generar las señales reales.

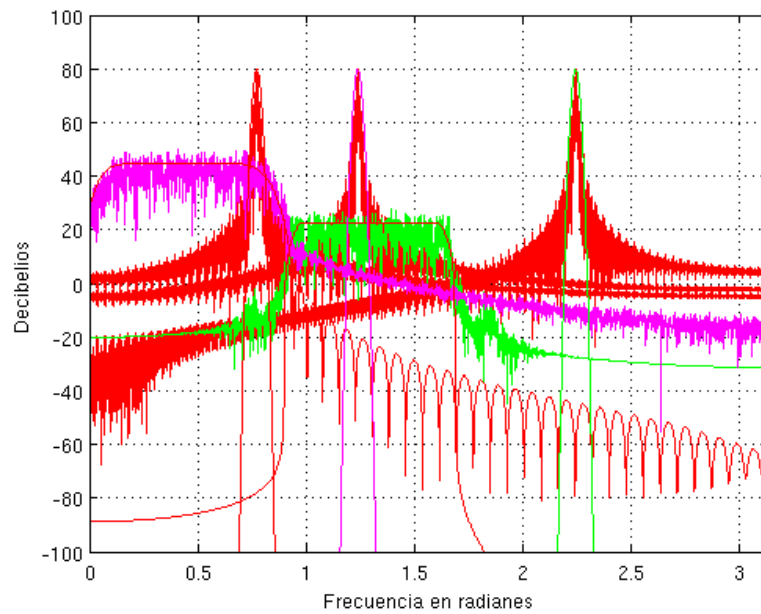


Figura 5.7: Conjunto de las señales generadas en simulink y matlab.

### 5.3. Modelo de autocorrelación de la señal en el canal ISM

Utilizando las señales obtenidas en la anterior sección, se introduce en esta el modelo de autocorrelación de la señal ISM, que está basado en una variación lineal de aquellas.

Este modelo se puede escribir como,

$$\mathbf{r}[n] = \sum_{i=1}^L (a_i \mathbf{R}_i[n] \mathbf{r}_{h_i}) \quad (5.7)$$

Donde  $a_i$  son las amplitudes de cada una de las señales,  $\mathbf{R}_i$  es la matriz de autocorrelaciones de las señales a estimar,  $\mathbf{r}_{h_i}$  es la autocorrelación del canal y  $L$  es el número total de las posibles señales.

Se ha supuesto que las señales son incorreladas, es decir, que se considera el mismo canal para todas las señales, ya que no se solapan en el espectro, la ecuación (5.7) se puede escribir como,

$$\mathbf{r}[n] = \sum_{i=1}^L (a_i \mathbf{R}_i[n]) \mathbf{r}_h \quad (5.8)$$

Donde  $\mathbf{r}_h$  es la concatenación de las autocorrelaciones del canal.

#### 5.3.1. Estimación de los parámetros mediante el método de mínimos cuadrados

El objetivo de este modelo consiste en obtener los valores óptimos de  $a_i$  y de  $\mathbf{r}_h$ , siguiendo el criterio MMSE, a fin de aproximar la autocorrelación de la señal ISM

### Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados (LS) [3], consiste en la minimización del error cuadrático medio de la estimación,  $\min E(\epsilon[n])^2$ . Para ello considérese el estimador lineal

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{w}^T \mathbf{x}[n] + \epsilon[n] \quad (5.9)$$

donde,  $\mathbf{y}$  es la señal de salida,  $\mathbf{x}$  es la señal de entrada,  $\mathbf{w}$  son los parámetros del estimador y de estimación, y  $\epsilon$  es el error introducido por el canal.

El error cuadrático medio se define como

$$E|\epsilon[n]|^2 = E|\mathbf{y}[n] - \mathbf{w}^T \mathbf{x}[n]|^2 \quad (5.10)$$

Desarrollando el cuadrado, se obtiene

$$E|\epsilon[n]|^2 = E|\mathbf{y}^2[n] + \mathbf{w}^T \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w} - 2\mathbf{y}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w}| \quad (5.11)$$

La optimización consiste en minimizar el error cuadrático con respecto de los parámetros  $\mathbf{w}$

$$\min_w (E|\mathbf{y}^2[n] + \mathbf{w}^T \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w} - 2\mathbf{y}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w}|) \quad (5.12)$$

Para esto no más que calcular la derivada de la esperanza e igualar a cero,

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{w}} E|\epsilon[n]|^2 = E[2\mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w} - 2\mathbf{y}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w}] = 0 \quad (5.13)$$

Al derivar obtenemos,

$$E[\mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w} - \mathbf{y}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{w}] = 0 \quad (5.14)$$

En notación matricial, se puede escribir

$$E[\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n]] = \mathbf{R} \quad (5.15)$$

$$E[\mathbf{x}^T[n]\mathbf{y}[n]] = \mathbf{p} \quad (5.16)$$

Haciendo el cambio en la ecuación (5.14) tenemos,

$$\mathbf{R}\mathbf{w} - \mathbf{p} = 0 \quad (5.17)$$

Despejando  $\mathbf{w}$ ,

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p} \quad (5.18)$$

Dado que no se dispone de los valores exactos de las esperanzas, es necesario hacer aproximaciones muestrales. Así, para la autocorrelación se toma la aproximación:

$$E\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n] \approx \frac{1}{N}\Sigma\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n] = \frac{1}{N}\mathbf{X}\mathbf{X}^T \quad (5.19)$$

Y para la correlación cruzada es tiene la aproximación:

$$E\mathbf{x}[n]\mathbf{y}[n] \approx \frac{1}{N}\mathbf{X}\mathbf{y} \quad (5.20)$$

Por lo que se puede escribir a partir de la ecuación (5.17),

$$\mathbf{w} = (\mathbf{X}\mathbf{X}^T)^{-1}\mathbf{X}\mathbf{y} \quad (5.21)$$

Definimos  $\mathbf{x}$  como una matriz que contiene un conjunto de  $N$  datos de entrada ( $\mathbf{X} = \mathbf{x}[1] \dots \mathbf{x}[N]$ )

Partiendo de los  $N$  datos de entrada se puede escribir,

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}^T \mathbf{w} \quad (5.22)$$

Premultiplicando a ambos lados por  $\mathbf{X}$  se tiene

$$\mathbf{X}\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T \mathbf{w} \quad (5.23)$$

y despejando  $\mathbf{w}$  se obtiene,

$$\mathbf{w} = (\mathbf{X}\mathbf{X}^T)^{-1} \mathbf{X}\mathbf{y} \quad (5.24)$$

Lo que consiste en un método alternativo de deducción del algoritmo de mínimos cuadrados.

### **Aplicación del método de mínimos cuadrados al ajuste del modelo de autocorrelación**

Utilizando el algoritmo anterior, vamos a intentar encontrar el canal y las amplitudes óptimas para la estimación de las señales. Para calcular las amplitudes óptimas partimos del canal óptimo, el cual lo calculamos a partir de la ecuación (5.8) sabiendo, como se dijo en la sección anterior, que las señales son incorreladas. De la ecuación (5.8) se puede despejar el vector de la autocorrelación del canal y obteniendo de esta forma la ecuación (5.25)

$$\mathbf{r}_h = \Sigma(a_i \mathbf{R})^{-1} \mathbf{r} \quad (5.25)$$

Para calcular las amplitudes óptimas, partimos de la ecuación (5.7). Supone-



mos que  $\mathbf{a}$  es un vector de amplitudes deterministas, por lo que lo podemos sacar como factor común. De esta forma tenemos la matriz  $\theta$ , que se define como

$$\theta^T = \mathbf{R}_1 \mathbf{r}_h \ \mathbf{R}_2 \mathbf{r}_h \ \dots \ \mathbf{R}_L \mathbf{r}_h \quad (5.26)$$

Haciendo uso de  $\theta$ , de la cual hay que tener en cuenta que  $\mathbf{r}_h$  es el vector de la autocorrelación obtenido antes (ecuación 5.25), la ecuación (5.7) queda como,

$$\mathbf{r}[n] = \theta^T \mathbf{a} \quad (5.27)$$

Para despejar  $\mathbf{a}$ , en primer lugar hay que premultiplicar la ecuación (5.26) por  $\theta$ .

$$\theta \mathbf{r} = (\theta \theta^T) \mathbf{a} \quad (5.28)$$

Posteriormente, dado que  $\theta \theta^T$  es linealmente positivo, se puede premultiplicar (5.28) por  $(\theta \theta^T)^{-1}$ , lo que da lugar a,

$$\mathbf{a} = (\theta \theta^T)^{-1} \theta \mathbf{r} \quad (5.29)$$

Este algoritmo se realiza de manera recursiva hasta un valor que tiende a infinito. Partiendo de un conjunto de amplitudes iniciales, llámese  $\mathbf{a}$ , se calcula su canal correspondiente mediante la ecuación (5.25). Una vez obtenido  $\mathbf{r}_h$ , se pasa a calcular las amplitudes necesarias para nuestras señales estimadas. El paso siguiente es, usando este último vector de amplitudes se vuelve a calcular la autocorrelación del canal y así sucesivamente, hasta llevar, como se ha dicho antes, a un valor que tiende a infinito, en donde habremos conseguido obtener los valores de las amplitudes y del canal óptimos.

## **5.4. Resumen**

En este capítulo se ha realizado la estimación espectral de las amplitudes y del canal para las señales sintetizadas en Matlab. Para lograr la estimación óptima se ha utilizado el método de mínimos cuadrados, con el que se intenta minimizar el error entre la señal real y la estimada. Con esto se conseguía encontrar las amplitudes y el canal óptimos, donde en el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos y se comprueba que se ha conseguido llegar al objetivo final.

# Capítulo 6

## Experimentos

### 6.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha realizado la estimación espectral de los parámetros óptimos para ajustar la señal sistemizada en Matlab a la señal real.

En las secciones siguientes se muestran los resultados obtenidos de estas estimaciones, teniendo en cuenta diferentes tipos de canales, como canal gaussiano, canal plano con desvanecimiento y canal dispersivo con desvanecimiento. También se han realizado dos tipos de experimentos con cada uno de los canales, uno teniendo en cuenta que todas las amplitudes son iguales y otro que las amplitudes de los esclavos Bluetooth son diferentes al resto de señales.

### 6.2. Experimento en canal gaussiano

En esta sección se considera que el canal a través del cual se transmiten nuestras señales presenta una respuesta plana en frecuencia, por lo que el canal en el dominio temporal debe ser una delta de Kronecker. Además el ruido añadido será de tipo gauss.

### 6.2.1. Señales con amplitudes iguales

En este caso las amplitudes iniciales se consideran todas iguales. Una vez inicializado este parámetro se debe calcular el canal, con la ecuación (5.25), que tras una serie de iteraciones se llega a obtener el canal óptimo. En cada iteración, una vez obtenido el canal hay que obtener las amplitudes óptimas, con la ecuación (5.29). Estas amplitudes a su vez se vuelven a usar para calcular el nuevo canal. Esto se repite reiteradamente hasta que las amplitudes y el canal convergen, significando que se ha conseguido obtener los valores óptimos de ambos y de esta forma poder afirmar que se hizo una buena estimación de los parámetros.

En la figura 6.1 se muestran los valores finales de las amplitudes, donde se puede comprobar que en la frecuencia correspondiente a 37 MHz se encuentra la señal Wifi modulada con OFDM, en la frecuencia correspondiente a 14 MHz se encuentra la señal Wifi modulada con CCK y las tres restantes corresponde a la señal de los dispositivos Bluetooth, tal que la frecuencia de 22 MHz corresponde al maestro y la de 63 MHz y 35 MHz a los esclavos.

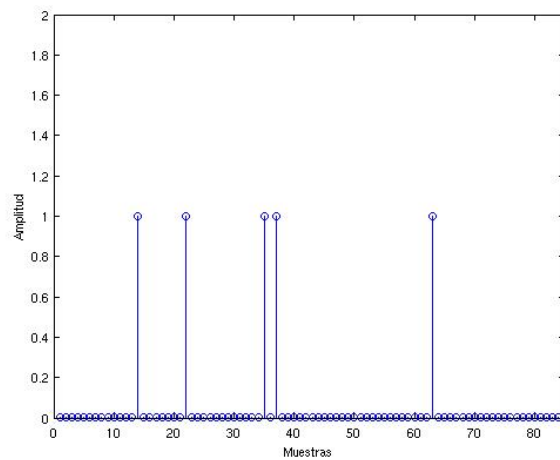


Figura 6.1: Amplitudes finales de cada una de las posibles señales con canal sin desvanecimiento.

En la gráfica 6.2 se muestra como van convergiendo las amplitudes a sus valores óptimos, esto quiere decir que la diferencia entre las amplitudes reales y las nuestras es prácticamente cero y que el error entre ellas tiende a cero. El cálculo realizado para el gradiente de las amplitudes es:

$$\nabla a(n) = ||a(n+1) - a(n)||^2 \quad (6.1)$$

En la figura 6.2 se representa la convergencia de las amplitudes según la ecuación (6.1).

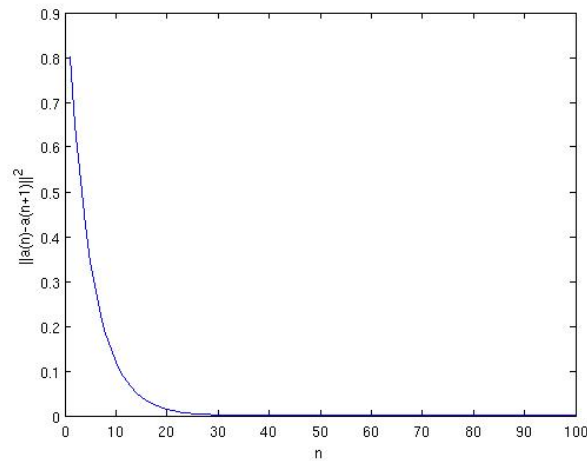


Figura 6.2: Convergencia de las amplitudes de las señales con canal sin desvanecimiento.

En la gráfica 6.3 se muestra los resultados obtenidos sobre el canal. Se puede comprobar como es prácticamente una delta de Kronecker en el dominio del tiempo, ya que en el Simulink se supuso que en el canal no había distorsión, por lo tanto si el canal  $h[n] = \delta[n]$  entonces su autocorrelación también lo sera, es decir,  $rh[n] = \delta[n]$  .

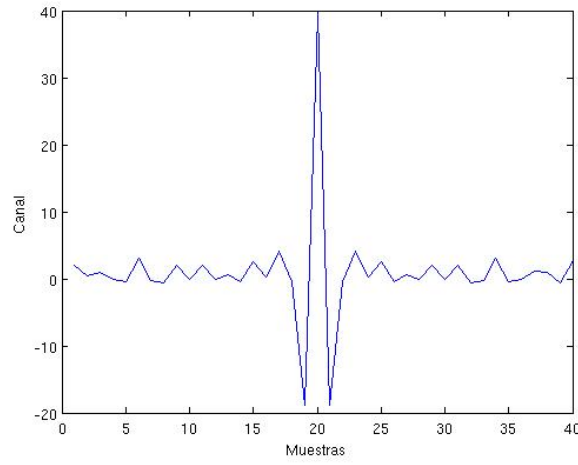


Figura 6.3: Canal.

Con respecto a la convergencia del canal se puede decir que desde la primera iteración se obtiene el canal óptimo, ya que su valor en el instante cero es de  $6 \times 10^{-23}$ . Para el cálculo del canal óptimo se realiza de la misma forma que para las amplitudes (ecuación 6.2),

$$\nabla h(n) = |||h(n+1) - h(n)|||^2 \quad (6.2)$$

### 6.2.2. Señales con amplitudes distintas

En este caso se considera que los dos esclavos tienen diferentes amplitudes respecto a los otros dispositivos.

Los pasos para obtener las amplitudes y el canal óptimos van a ser los mismos que en el caso de amplitudes iguales.

En la gráfica 6.10 se muestran las amplitudes finales de todas las posibles señales. Como en el caso anterior, se puede ver bastante más diferenciado cuales corresponden a Bluetooth y cuales a Wifi. Las frecuencias centrales para cada una de ellas son las mismas que en el caso anterior, como era de esperar.

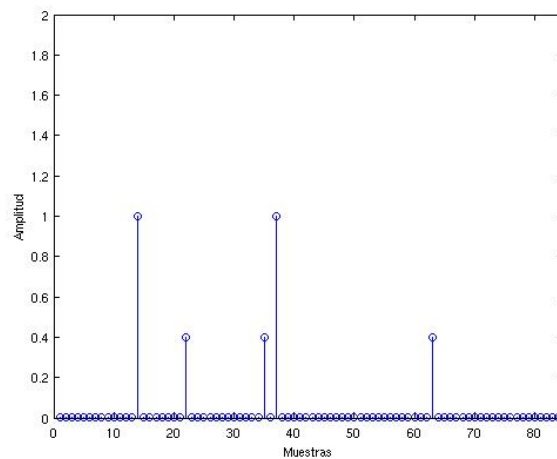


Figura 6.4: Amplitudes finales de las posibles señales con canal sin desvanecimiento.

En la gráfica 6.5 se comprueba que estas amplitudes convergen a sus valores óptimos, de la misma forma que cuando se inicializaban todas las amplitudes al mismo valor, como se puede ver en la gráfica 6.2. El cálculo realizado para el gradiente de las amplitudes es el que se muestra la ecuación (6.1).

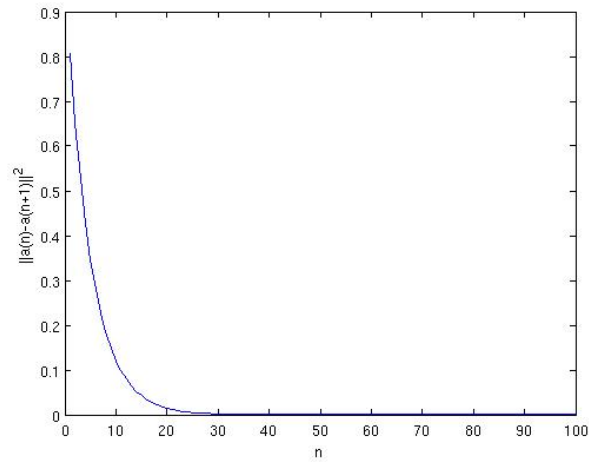


Figura 6.5: Convergencia de las amplitudes de las señales con canal sin desvanecimiento.

Para el canal, observando la gráfica 6.3 y 6.6 y comparándolas se observan que son las mismas, y era de esperar, ya que en este caso se sigue considerando un canal sin desvanecimiento.

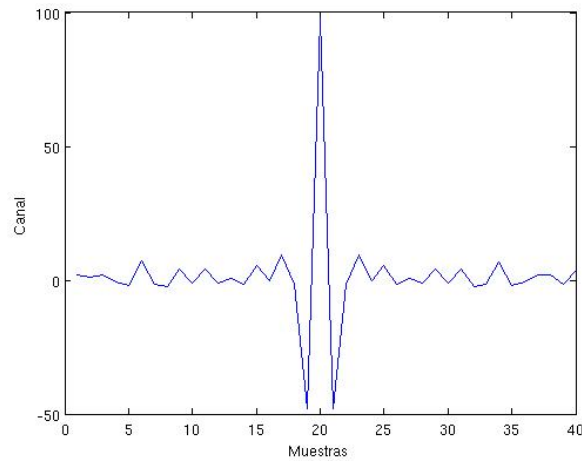


Figura 6.6: Canal.



Para este caso el canal óptimo resultante también tiende a cero, como en el caso anterior, por lo tanto se puede concluir que se ha conseguido obtener el canal realmente óptimo desde la primera iteración.

## 6.3. Canal con desvanecimiento plano

Con este canal lo que ocurre es que se transmiten señales cuyo ancho de banda es menor que el ancho de banda de coherencia del canal,  $B < B_{coh}$ , por lo que el canal se considera de banda estrecha, ya que la función de transferencia del canal presenta un comportamiento plano en el ancho de banda de la señal. El ancho de banda de coherencia del canal es una medida de la separación máxima entre dos componentes frecuenciales que mantiene un cierto grado de correlación. El desvanecimiento provocado por el canal será plano en frecuencia (flat fading), minimizando y en algunos casos evitando la interferencia entre símbolos (ISI), por este motivo no van a existir ni multitrayecto ni variabilidad temporal.

### 6.3.1. Señales con amplitudes iguales

En este caso volvemos a inicializar el vector de las amplitudes todas a uno. Y la forma de proceder para la obtención de las amplitudes óptimas es igual para para el caso de canal sin desvanecimiento. Las amplitudes finales, que se muestra en la figura 6.7, son exactamente las mismas que se obtuvieron para el caso del canal sin desvanecimiento. Se puede decir que el modelo va funcionando, ya que se siguen ajustado las señales a sus frecuencias centrales.

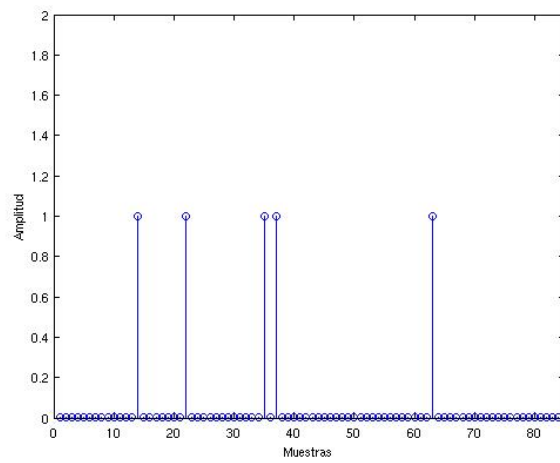


Figura 6.7: Amplitudes finales de cada una de las posibles señales.

En la gráfica 6.8 se muestra como van convergiendo las amplitudes a sus valores óptimos, esto quiere decir que la diferencia entre las amplitudes reales y las nuestras es prácticamente cero y que el error entre ellas tiende a cero. El cálculo realizado para el gradiente de las amplitudes es el cálculo que se realiza en la ecuación (6.1). En la figura 6.8 se muestran como convergen.

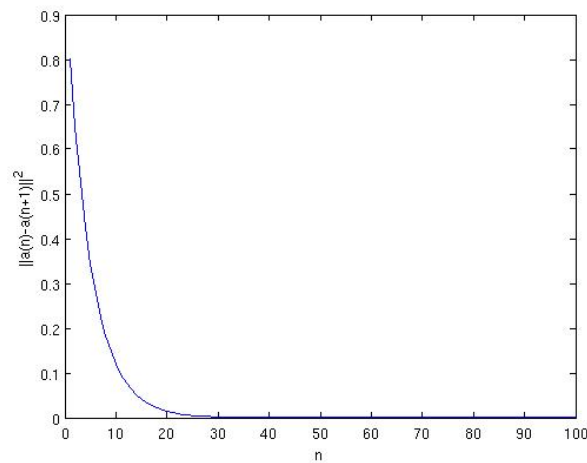


Figura 6.8: Convergencia de las amplitudes de las señales con canal con desvanecimiento plano.

En el caso del canal, en la gráfica 6.9 se puede comprobar como también es una delta en el dominio del tiempo, pero esta un poco más ancha que en el caso de usar un canal sin desvanecimiento.

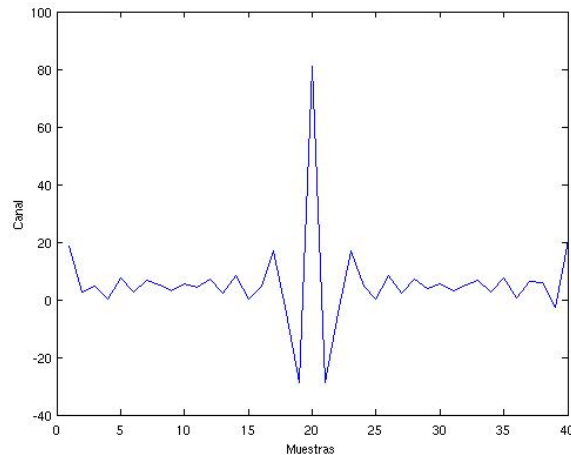


Figura 6.9: Canal.

También se puede decir que el canal converge en el instante cero, ya que el valor desde este momento se puede considerar prácticamente cero.

### 6.3.2. Señales con amplitudes distintas

En este caso se considera que los dos esclavos tienen diferentes amplitudes respecto a los otros dispositivos.

Los pasos para obtener las amplitudes y el canal óptimos van a ser los mismos que en el caso de amplitudes iguales.

En la gráfica 6.10 se muestran las amplitudes finales de todas las posibles señales. Como en el caso anterior, se puede ver bastante más diferenciado cuales corresponden a Bluetooth y cuales a Wifi. Las frecuencias centrales para cada una de ellas son las mismas que en el caso anterior, exactamente lo mismo que

en el caso de canal sin desvanecimiento.

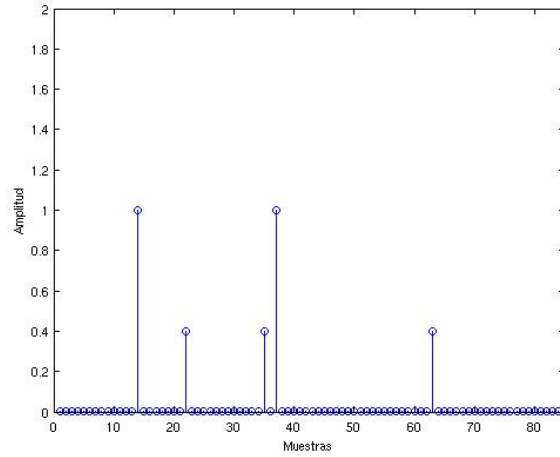


Figura 6.10: Amplitudes finales de las posibles señales con canal con desvanecimiento plano.

En la gráfica 6.11 se comprueba que estas amplitudes convergen a sus valores óptimos, de la misma forma que cuando se inicializaban todas las amplitudes a 1, como se puede ver en la gráfica 6.8. El cálculo realizado para el gradiente de las amplitudes es el que se muestra la ecuación 6.1 y se muestra en la figura 6.11.

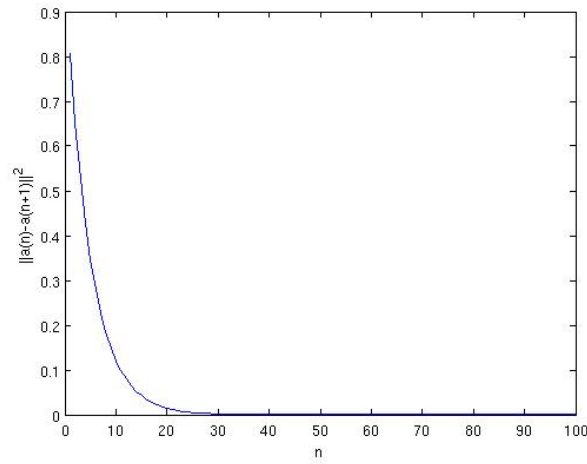


Figura 6.11: Convergencia de las amplitudes de las señales con canal con desvanecimiento plano.

Para el canal, observando la gráfica 6.9 y 6.12 y comparándolas se observan que son muy parecidas y esto era de esperar.

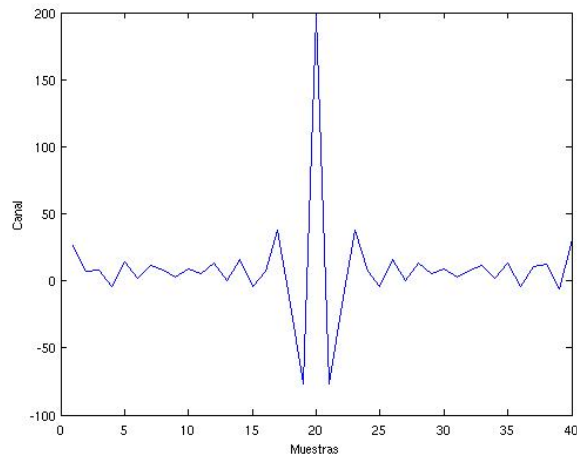


Figura 6.12: Canal.

El canal óptimo resultante en este caso también tiende a cero, como en el caso anterior, observando desde la primera iteración como se obtiene el óptimo.

## 6.4. Canal dispersivo

Con este canal lo que ocurre es que se transmite señales con un ancho de banda mayor que el ancho de banda de coherencia del canal,  $B > B_{coh}$ , el canal se considera de banda ancha. En el caso de este tipo de canales se genera una dependencia expresa de la matriz del canal con la frecuencia.

### 6.4.1. Señales con amplitudes iguales

En este caso, en el canal donde se transmiten nuestras señales se producen desvanecimientos con dispersión. Como en los casos anteriores, en la gráfica 6.13 podemos ver donde se encuentran las señales que se generan, donde se muestran claramente donde están las señales conociendo sus frecuencias centrales.

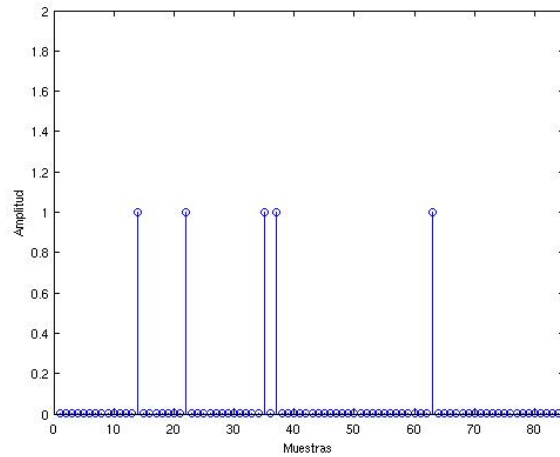


Figura 6.13: Amplitudes finales de cada una de las posibles señales.

En la gráfica 6.17 se muestra como van convergiendo las amplitudes a sus valores óptimos, esto quiere decir que la diferencia entre las amplitudes reales y las nuestras es prácticamente cero y que el error entre ellas tiende a cero. El cálculo realizado para el gradiente de las amplitudes es el mismo que la de la ecuación (6.1). En la figura 6.17 se muestran como convergen.

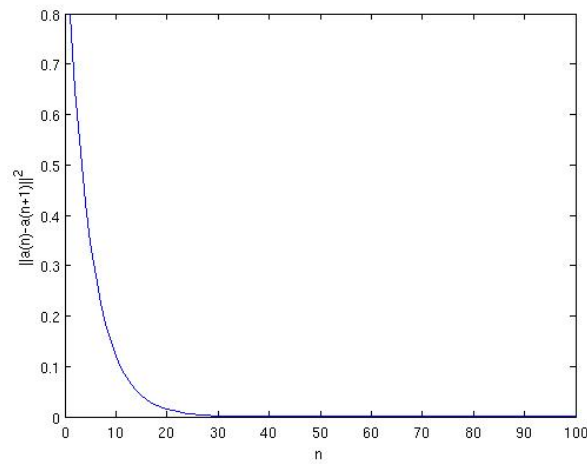


Figura 6.14: Convergencia de las amplitudes de las posibles señales con canal.

En el caso del canal, en la gráfica 6.15 se puede comprobar como también es una delta en el dominio del tiempo, pero más anchas que las anteriores.

El canal óptimo, como en los casos anteriores se obtiene desde la primera iteración.

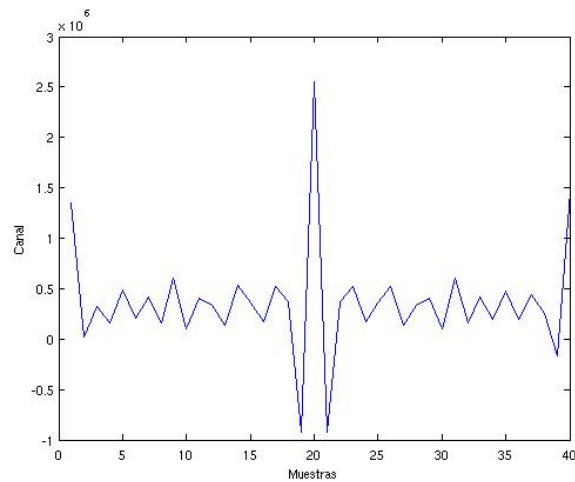


Figura 6.15: Canal.

#### 6.4.2. Señales con amplitudes iguales

En este caso se considera que las amplitudes de los dos esclavos son distintas a las de los otros dispositivos.

Los pasos para obtener las amplitudes y el canal óptimos van a ser los mismos que en el caso de amplitudes iguales.

Las amplitudes finales, lo mismo que la convergencia de las amplitudes, son exactamente iguales que en los casos anteriores, teniendo solamente en cuenta cuando las amplitudes son distintas.



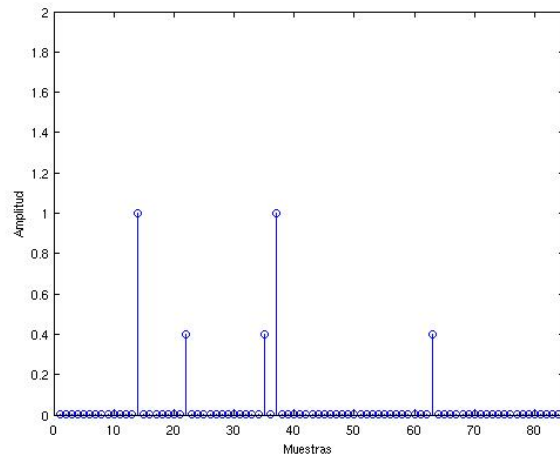


Figura 6.16: Amplitudes finales de las posibles señales usando un canal dispersivo.

Las amplitudes llegan a converger por lo tanto se puede concluir que se han llegado a estimar las verdaderas amplitudes de las señales generadas.

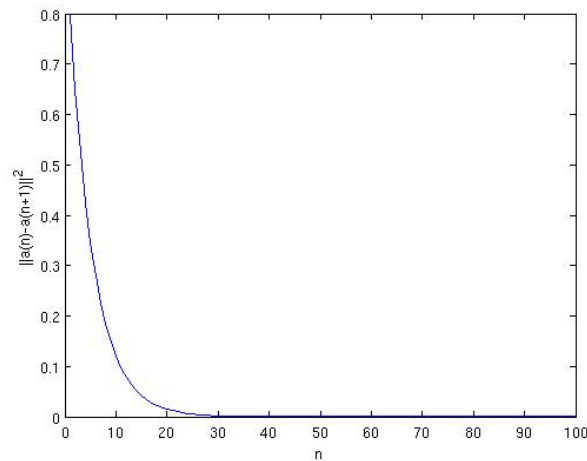


Figura 6.17: Convergencia de las amplitudes de las posibles señales con canal.

Para el canal, observando la gráfica 6.15 y 6.18 y comparándolas se observan, como en el caso de las amplitudes iniciales iguales de las posibles señales, este canal es más ancha usando este canal.

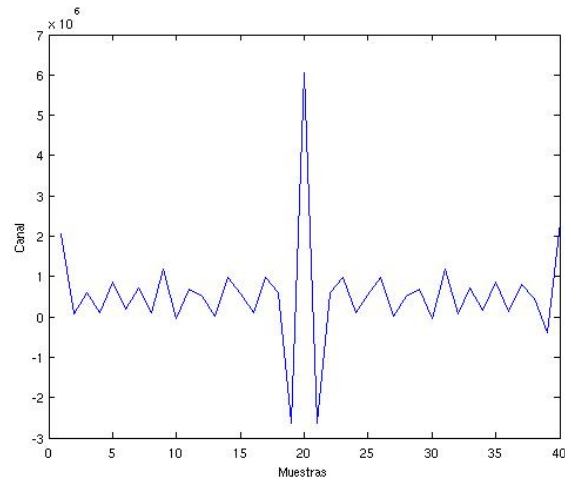


Figura 6.18: Canal.

El canal óptimo resultante en este caso también tiende a cero, como en el caso anterior. Por lo tanto se puede concluir que se ha conseguido obtener el canal realmente óptimo.

## Conclusiones

### 7.1. Resumen

Este proyecto se basa en un estudio de la transmisión conjunta de las tecnologías Wifi y Bluetooth, para poder observar como se comportan teniendo en cuenta diferentes canales.

Al inicio de este proyecto se tuvo que hacer un estudio exhaustivo sobre las tecnologías que se querían generar.

Necesitábamos conocer como funcionaba la capa física de cada una de las ellas, saber el tamaño de cada una de las muestras que se transmiten, los tiempos de muestreo, frecuencias y canales en los que trabaja cada uno.

Uno de los puntos importantes a destacar es la simulación, con la herramienta Simulink, de la tecnología Wifi, IEEE 802.11g, de la que hemos simulado dos tipos de modulaciones OFDM y CCK. Partíamos de los bloques que generaban los estándares IEEE 802.11a y b, los cuales podíamos usar, ya que el 802.11a trabaja con modulación OFDM y con el 802.11b trabaja con modulación CCK, pero necesitábamos modificar algunos parámetros. Esta simulación se puede ver

en profundidad en el capítulo 4, en el apartado 4.2.2.

En Bluetooth, partíamos de un solo dispositivo, con lo que tuvimos que añadir otros dos más, para poder realizar la simulación con un maestro y dos esclavos. Tuvimos que crear una función que nos generara las frecuencias, positivas para el maestro y negativas para los esclavos, cada una de ellas aleatorias, y como en el caso del CCK, también tuvimos que añadir el mismo canal que para OFDM. Esta simulación es la que se cuenta con más detalle en el capítulo 4, en el apartado 4.2.2.

Partiendo de las frecuencias centrales de cada una de las señales, estas se usaron para la generación de las funciones de autocorrelación de cada una de ellas. Con estas funciones, mediante el modelo de mínimos cuadrados, fue posible la estimación paramétrica de las amplitudes y del canal óptimos de las señales generadas en Matlab, donde sus resultados se pueden comprobar en el capítulo 6.

## 7.2. Resultados

Como se ha podido ver en el capítulo 6, se muestran las soluciones de los experimentos realizados, y se puede comprobar que conseguimos llegar a nuestro objetivo, es decir, obtener las amplitudes y el canal óptimos, todo esto aplicando el método de mínimos cuadrados.

También hemos podido determinar en cualquier instante de tiempo que señales son las que se están transmitiendo y si estas se solapan poder, en un futuro, evitar las interferencias entre ellas.

## 7.3. Trabajos futuros

Este proyecto es el comienzo o inicialización de varios proyectos relacionados con los problemas de interferencias entre dispositivos inalámbricos que trabajan en la banda del ISM. Algunos de los proyectos posibles podrían ser:

- Ampliación a más señales del canal ISM.
- Puesta en marcha de:
  - Algoritmos alternativos.
  - Comparación con algoritmos del estado del arte ( por ejemplo, algoritmo de Thomson).

# Bibliografía

- [1] *IEEE Std 802.15.1: IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks—Specific requirements*, enero 2005.
- [2] V. K. Bhargava E. Hossain, editor. *Cognitive Wireless Communication Networks*. Springer, N.Y., 2007.
- [3] Simon Haykin. *Adaptative filter theory*. New Jersey, cuarta edición edition, 2002.
- [4] J. Mitola III. *Cognitive Radio Architecture. The Engineering Foundations of Radio XML*. Wiley, N.J., 2006.
- [5] Paramvir Bahl Jim Lansford. The design and implementation of homerf:a radio frequency wireless networking standard for the connected home. 88(24):24–25, Octubre 2000.
- [6] J.Mikulka and S.Hanus. “bluetooth and ieee 802.11b/g coexistence simulation”. pages 20–74, 2004.
- [7] R.Linares Ruiz, J.Andrés Quijano, and G.Andrés Holguín. Implementación del protocolo bluetooth para la conexión inalámbrica de dispositivos

- electrónicos programables. *Scientia et Technica Año X*, (24):19–37, Mayo 2004.
- [8] Jin-Shyan Lee. Yu-Wei Su. Chung-Chou Shen. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, uwb, zigbee and wi-fi. *Scientia et Technica Año X*, (23):19–37, Noviembre 2007.
- [9] E.Garcia Villegas, E.López-Aguilera, R.Vidal, and J.Paradells. Effect of adjacent-channel interference in ieee 802.11 wlans. pages 20–74, Mayo 2007.
- [10] *IEEE Std 802.11: IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements*, Mayo 2007.
- [11] *IEEE Std 802.11g: IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements Part Ii: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, Mayo 2003.